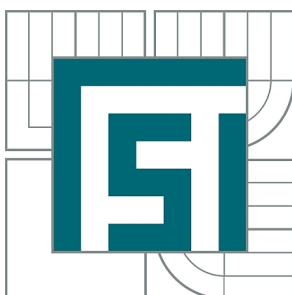


# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY  
A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## VOLBA VHODNÉ KOMERČNÍ ELEKTRONIKY PRO VIBRAČNÍ GENERÁTORY VUT

PROPOSE OF POWER MANAGEMENT FOR VIBRATION POWER GENERATOR BUT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KRIŠTOF HEGER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Krištof Heger

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Volba vhodné komerční elektroniky pro vibrační generátory VUT**

v anglickém jazyce:

### **Propose of power management for vibration power generator BUT**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrační generátor je zařízení, které vyrábí elektrickou energii z vibrací strojních soustav. Výkon takového zařízení je v řádu několika miliwatt, ale s vývojem moderní elektroniky i tento výkon dostačuje pro napájení diagnostických a mobilních zařízení. Úkolem této práce je pro toto zařízení analyzovat možnosti zpracování generované elektrické energie a zvolit vhodnou elektroniku, která zajistí jeho autonomní provoz.

Cíle bakalářské práce:

1. rešerše komerčních produktů power management
2. volba vhodných strategií řízení odběru elektrické energie
3. volba koncepce elektroniky pro VUT generátory
4. návrh elektroniky pro vibrační generátor, který byl již vyvinut na VUT v Brně

Seznam odborné literatury:

Priya S, Inman DJ: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009.

Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 14.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Táto práca sa zaoberá voľbou elektroniky, ktorá by bola schopná zabezpečiť efektívne spracovanie a využitie energie vyrobenej vibračným generátorom vyvinutým na VUT v Brne. Táto elektronika spadá do oblasti power management systémov, ktoré zabezpečujú vhodnú premenu a správu elektrickej energie.

## **Abstract**

This thesis deals with the choice of electronics able to provide effective usage and processing of energy produced by the vibration power generator developed at BUT Brno. The electronics falls into the category of power management systems which offer suitable conversion and management of electric energy.

## **Kľúčové slová**

vibračný generátor, power management, energy harvesting, zvyšujúci regulátor, znižujúci regulátor, lineárny regulátor, nábojová pumpa, PMIC

## **Keywords**

vibration power generator, power management, energy harvesting, boost converter, buck converter, linear regulator, charge pump, PMIC

## **Bibliografická citácia**

HEGER, K. *Volba vhodné komerční elektroniky pro vibrační generátory VUT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

## **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „ Volba vhodnej komerčnej elektroniky pro vibrační generátory VUT “ vypracoval samostatne pod vedením školiteľa a s použitím poznatkov získaných zo zdrojov uvedených na konci tejto práce.

V Brne dňa 24. 05. 2012

.....  
Podpis

## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za cenné rady, námety a pripomienky, ako aj za jeho ochotu.

# Obsah

|   |            |
|---|------------|
| <b>1. Úvod .....</b>  | <b>9</b>   |
| <b>2. Ciele práce .....</b>   | <b>10</b>  |
| <b>3. Formulácia problému .....</b>   | <b>11</b>  |
| <b>4. Vibračný generátor (Vibration Energy Harvester) .....</b>                     | <b>12</b>  |
| 4.1. Popis funkcie vibračného generátora .....                                      | 13         |
| 4.1.1. Rezonančný mechanizmus .....   | 13         |
| 4.1.2. Budiaci obvod .....  | 14         |
| 4.1.3. Elektronika .....  | 15         |
| 4.2. Parametre a charakteristiky vibračného generátora .....                        | 16         |
| <b>5. Power management .....</b>  | <b>188</b> |
| 5.1. Power management zariadenia a princíp ich činnosti .....                       | 18         |
| 5.1.1. Lineárny regulátor (Linear Regulator) .....                                  | 18         |
| 5.1.2. DC-DC prepínací regulátor (DC-DC Switching Regulator) .....                  | 20         |
| 5.1.3. Nábojová pumpa (Charge Pump, Switched-Capacitor Regulator) .....             | 22         |
| 5.1.4. Power management integrované obvody (PMIC) .....                             | 24         |
| 5.1.5. Systémy správy batérií (Battery Management Systems) .....                    | 24         |
| <b>6. Energy storage .....</b>  | <b>25</b>  |
| 6.1. Primárne batérie (Primary Batteries, Non-Rechargeable Batteries) .....         | 25         |
| 6.2. Sekundárne batérie (Secondary Batteries, Rechargeable Batteries) .....         | 26         |
| 6.3. Superkapacitory (Supercapacitors, Ultracapacitors) .....                       | 27         |
| 6.4. Batérie s tenkým filmom (Thin Film Batteries) .....                            | 27         |
| <b>7. Prehľad power management systémov pre vibračné generátory .....</b>           | <b>28</b>  |
| <b>8. Analýza rôznych energetických stavov vibračného generátora .....</b>          | <b>35</b>  |
| 8.1. Chovanie modelu vibračného generátora pri buzení harmonickými vibráciami ..... | 37         |
| 8.2. Voľba komerčnej elektroniky pre jednotlivé energetické stavy .....             | 40         |
| 8.2.1. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.01 – 0.1 G .....                                | 40         |
| 8.2.2. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.1 G – 0.3 G .....                               | 41         |
| 8.2.3. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.3 G a viac .....                                | 42         |
| 8.2.4. Ďalšie power management zariadenia použiteľné ako alternatívy .....          | 42         |
| <b>9. Zhrnutie výsledkov práce .....</b>  | <b>43</b>  |
| <b>10. Záver .....</b>  | <b>44</b>  |
| <b>11. Zoznam použitých zdrojov .....</b>   | <b>45</b>  |
| <b>12. Zoznam použitých symbolov .....</b>  | <b>48</b>  |
| <b>13. Zoznam použitých obrázkov .....</b>  | <b>49</b>  |
| <b>14. Zoznam príloh .....</b>  | <b>51</b>  |



## 1. Úvod

S rozvojom techniky a priemyslu sa čoraz viac kladú nároky na výkonnosť technických zariadení ako aj na minimalizáciu ich rozmerov. Zároveň sa kladie dôraz na získavanie energie potrebnej na prevádzku týchto zariadení zo zdrojov, ktoré nie sú škodlivé pre životné prostredie a ktoré sú obnoviteľné, to znamená prírodné zdroje ako napr. voda, vietor, teplo, slnečné žiarenie, vibrácie. Tieto zdroje však v technických aplikáciách v minulosti nenachádzali širšie uplatnenie z dôvodu poskytovania nedostatočného množstva energie. S vývojom elektroniky a príchodom energy harvesting zariadení sa ale situácia mení. Tieto zariadenia dokážu spracovávať rôzne druhy okolitej energie a generovať výkony rádovo v mikrowattoch až miliwattoch, ktoré postačujú na napájanie moderných prístrojov, ako napr. bezdrôtových senzorov, medicínskych zariadení, a svoje uplatnenie nájdu aj v komerčnej sfére (napr. diaľkové ovládače, hodinky, mobilné telefóny) alebo vo vojenských a leteckých aplikáciách, prípadne aj v MEMS technológiách. V dnešnej dobe slúžia hlavne ako sekundárny zdroj energie dopĺňujúci napájanie batériami, do budúcnosti by však mohli plne vykonávať funkciu primárneho zdroja a tým úplne nahradiť nutnosť použitia batérií – vyriešili by sa problémy s ich životnosťou, servisom a škodlivosťou voči životnému prostrediu.

Za hlavnú nevýhodu sa dá považovať fakt, že zatiaľ nebolo vyvinuté zariadenie, ktoré by bolo schopné spracovať všetky okolité druhy energií a ktoré by bolo zároveň použiteľné v rôznych druhoch aplikácií. Aj keď niektoré firmy postupne prichádzajú na trh s prototypmi, ktoré sú v rámci jedného zariadenia schopné využívať energiu z viacerých zdrojov, stále platí, že každý generátor musí byť navrhnutý špeciálne pre danú aplikáciu, v ktorej bude využívaný, čo nie je z hľadiska univerzálnosti optimálne riešenie. Ako ďalšia nevýhoda sa môže javiť schopnosť všeobecne generovať len malé výkony, ktoré sú nepoužiteľné vo väčších výkonových aplikáciách, a taktiež pomerne nízka účinnosť (značné energetické straty).

Aby mohla byť vygenerovaná energia čo najefektívnejšie využitá, používa sa s generátormi power management elektronika, ktorá má na starosti úpravu tejto energie a jej spravovanie. Táto elektronika teda zabezpečuje optimalizáciu prenosu energie medzi generátorom a koncovým zariadením.

## 2. Ciele práce

Hlavnými cieľom tejto práce je voľba vhodnej komerčnej elektroniky pre vibračný generátor špeciálne vyvinutý na VUT v Brne. Ďalšie ciele, ktoré majú byť dosiahnuté, sú:

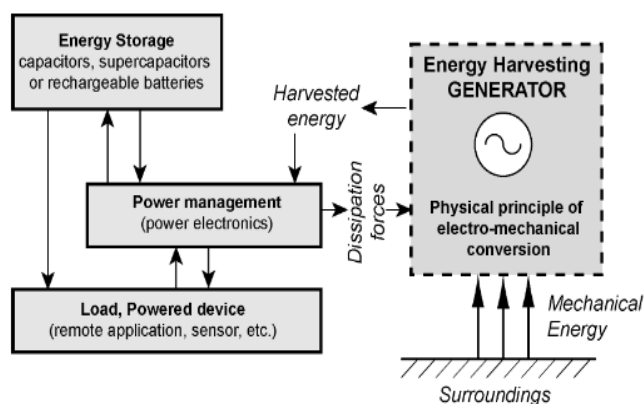
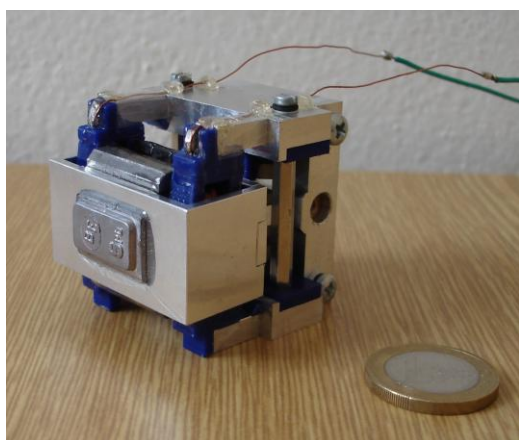
- rešerš komerčných power management produktov
- prehľad do dnešnej doby vyvinutých nekomerčných riešení špecializovaných na vibračné generátory
- voľba koncepcie elektroniky pre VUT vibračný generátor na základe jeho chovania za rôznych podmienok

### **3. Formulácia problému**

Vibračný generátor, na ktorý je táto práca zameraná, patrí do kategórie energy harvesting zariadení, ktoré vyrábajú elektrickú energiu z okolitých vibrácií na základe Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie. Výstupom generátora je striedavé napätie, ktoré však nie je vhodné pre napájanie bežnej elektroniky. Preto je nutné toto napätie usmerniť AC-DC usmerňovačom, ktorý je v tomto prípade realizovaný Graetzovým mostíkom. Problémom tohto generátora je však fakt, že generuje veľmi malý výkon na záťaži oproti jeho celkovému disipatívnemu výkonu, ktorý je niekoľkonásobne väčší. Tým dosahuje generátor veľké energetické straty a nízku účinnosť. Pre čo najefektívnejšie využitie generovanej energie je teda potrebné do celkového energy harvesting systému pridať elektroniku, ktorá bude mať na starosti práve riešenie tohto problému. Takou elektronikou sú power management systémy, o ktorých táto práca pojednáva.

## 4. Vibračný generátor (Vibration Energy Harvester)

V tejto kapitole sú na základe poznatkov získaných z [1] popísané najdôležitejšie časti vibračného generátora vyvinutého na VUT v Brne a znázorneného na obr. 4.1, pričom popis uvádza aj niektoré dôležité matematické vzťahy pre pochopenie princípu funkcie jednotlivých častí. Taktiež sú uvedené základné parametre a charakteristiky doplnené grafmi výstupných elektrických veličín pre ucelený prehľad možností tohto generátora. Generátor by mal spolu s vhodne zvolenou power management elektronikou, prípadne energy storage komponentmi, tvoriť po pripojení k záťaži ucelený energy harvesting systém, ktorého schéma je zobrazená na obr. 4.1. Takýto systém rieši problémy týkajúce sa použitia elektrickej kabeľáže pre napájanie senzorov, taktiež je dobrou voľbou pre aplikácie, ktoré sa nachádzajú na ťažko dostupných alebo nebezpečných miestach, kde je použitie batériových článkov ako primárneho zdroja energie nepraktické z hľadiska údržby v dôsledku ich krátkodobej životnosti, alebo kde je ich aplikácia vylúčená z dôvodu chemických prvkov, ktoré obsahujú. V neposlednom rade je výhodný aj z ekologického hľadiska, pretože využíva vibrácie ako zdroj energie a tým neznečisťuje životné prostredie.



Obrázok 4.1: Elektromagnetický vibračný generátor vyvinutý na VUT v Brne a schéma celkového energy harvesting systému.

Prevzaté z: [2], [19]

## 4.1. Popis funkcie vibračného generátora

Generátor vyvinutý na VUT je tvorený troma základnými časťami:

- rezonančný mechanizmus
- budiaci obvod
- elektronika

### 4.1.1. Rezonančný mechanizmus:

Rezonančný mechanizmus funguje na princípe mechanického kmitania s tlmením. Jedná sa o lineárne kmitanie s jedným stupňom voľnosti, ktoré platí pre malé kmity okolo rovnovážnej polohy s výchylkou do  $5^\circ$ . Popisuje ho rovnica

$$m\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + k\varphi = Q(t), \quad (4.1)$$

kde

$m$  - celková hmotnosť sústavy, [kg]

$b$  - celkové tlmenie sústavy, [N.s.m<sup>-1</sup>]

$k$  - celková tuhosť sústavy, [N.m<sup>-1</sup>]

$Q(t)$  - budenie sústavy v závislosti na čase, [N, m.s<sup>-2</sup>]

$\ddot{\varphi}$  - uhlové zrýchlenie, [rad.s<sup>-2</sup>]

$\dot{\varphi}$  - uhlová rýchlosť, [rad.s<sup>-1</sup>]

$\varphi$  - uhlová výchylka, [rad]

Vychádzajúc zo schémy generátora na obr. 4.2, upravíme rovnicu (4.1) do tvaru

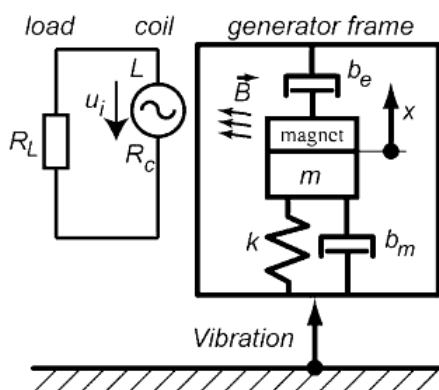
$$m\ddot{x} + (b_e + b_m)\dot{x} + kx = m\ddot{z}, \quad (4.2)$$

kde

$b_e$  - elektromagnetické tlmenie, [N.s.m<sup>-1</sup>]

$b_m$  - mechanické tlmenie, [N.s.m<sup>-1</sup>]

$\ddot{z}$  - uhlové zrýchlenie budiacej veličiny, [rad.s<sup>-2</sup>]



Obrázok 4.2: Všeobecná schéma vibračného generátora  
(veličina  $x$  zodpovedá  $\varphi$  vo vzťahu 4.1).

Prevzaté z: [3]

Ďalšími dôležitými veličinami charakterizujúcimi rezonančný mechanizmus sú vlastná uhlová frekvencia  $\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  v  $[\text{rad.s}^{-1}]$ , kritické tlmenie  $b_k = 2m\Omega$  v  $[\text{N.s.m}^{-1}]$  a pomerný útlm sústavy  $\zeta_0 = \frac{b_e + b_m}{b_k}$  [-], pomocou ktorých môžeme rovnicu kmitania prepísať do tvaru

$$\ddot{x} + 2\zeta_0\Omega\dot{x} + \Omega^2x = A_v, \quad (4.3)$$

kde

$A_v$  - zrýchlenie budiacich vibrácií,  $[\text{G, m.s}^{-2}]$

#### 4.1.2. Budiaci obvod:

Budiaci obvod je súčasťou rezonančného mechanizmu, ktorá v mnohých prípadoch tvorí najpodstatnejšiu časť hmotnosti celého mechanizmu. Je zložený z jedného alebo viacerých permanentných magnetov a pólových nástavcov. Napätie indukované kmitavým pohybom budiaceho obvodu v závitoch cievky, ktorá je umiestnená vo vzduchovej medzere, je dané vzťahom

$$u_i = \dot{\phi}.l.B.N.L, \quad (4.4)$$

kde

$l$  - vzdialenosť cievky od osi otáčania (od nulovej polohy výchylky rezonančného mechanizmu),  $[\text{m}]$

$B$  - magnetická indukcia,  $[\text{T}]$

$N$  - počet závitov cievky, [-]

$L$  - dĺžka vodiča cievky,  $[\text{m}]$

Keď sa ku generátoru pripojí záťaž, začne cievkou na základe zákona o elektromagnetickej indukcii prechádzať prúd, čím vznikne elektromagnetická tlmiaca sila vyjadrená vzťahom

$$F = b_e v, \quad (4.5)$$

kde

$v$  - relatívna rýchlosť kmitania budiaceho obvodu,  $[\text{m.s}^{-1}]$

Táto elektromagnetická sila spôsobuje odoberanie disipatívneho výkonu z generátora, ktorý má tvar

$$P = \int_0^v F dv = \frac{1}{2} b_e v^2 \quad (4.6)$$

Z dôvodu generácie čo najväčšej hodnoty indukovaného napätia je celý budiaci obvod navrhnutý tak, aby bola dosiahnutá najväčšia možná hodnota magnetickej indukcie, resp. magnetického toku alebo jeho zmeny, vo vzduchovej medzere. Taktiež je optimalizovaná dĺžka cievky a počet jej závitov za účelom dosiahnutia maximálneho okamžitého celkového elektrického výkonu daného vzťahom

$$p = \frac{u_i^2}{R_c + R_z} = b_e \cdot l^2 \cdot \dot{\phi}^2, \quad (4.7)$$

kde

$R_c$  - odpor cievky, [ $\Omega$ ]

$R_z$  - odpor záťaže, [ $\Omega$ ]

Tento okamžitý elektrický výkon je zároveň totožný s okamžitým disipatívnym mechanickým výkonom, ktorý vychádza z rovnice (4.6) a má tvar

$$p = b_e v^2 \quad (4.8)$$

#### 4.1.3. Elektronika:

Elektronickou súčasťou generátora je usmerňovač striedavého napätia realizovaný pomocou Graetzovho mostíka, ktorý zabezpečuje premenu striedavého napätia na jednosmerné. Je tvorený 4 Schottkyho diódami, ktoré majú v priepustnom smere úbytky napätí v rozmedzí 0.09 – 0.39 V, v závislosti na prúde, ktorý nimi tečie. Na jeho výstupe je navyše zapojený filtračný kondenzátor o veľkosti 220  $\mu$ F, ktorý zabezpečuje vyhladenie výstupného jednosmerného napätia. Kým je generované nižšie napätie než je napätie diód v priepustnom smere (pre VUT generátor je uvažovaná hodnota priepustného napätia 0.2 V), usmerňovačom netečie prúd a generátor nie je ovplyvňovaný elektromagnetickým tlmením. Akonáhle generované napätie prekoná priepustné napätie diód, mostíkom začne tiecť prúd a na výstupe vzniká jednosmerné napätie, pričom na diódach dochádza k úbytku napätia, a teda časť generovaného výkonu sa stráca. Zároveň elektromagnetické tlmenie začne ovplyvňovať generátor a zmení sa aj ideálna hodnota jeho odporovej záťaže, pre ktorú generátor poskytuje maximálny výkon.

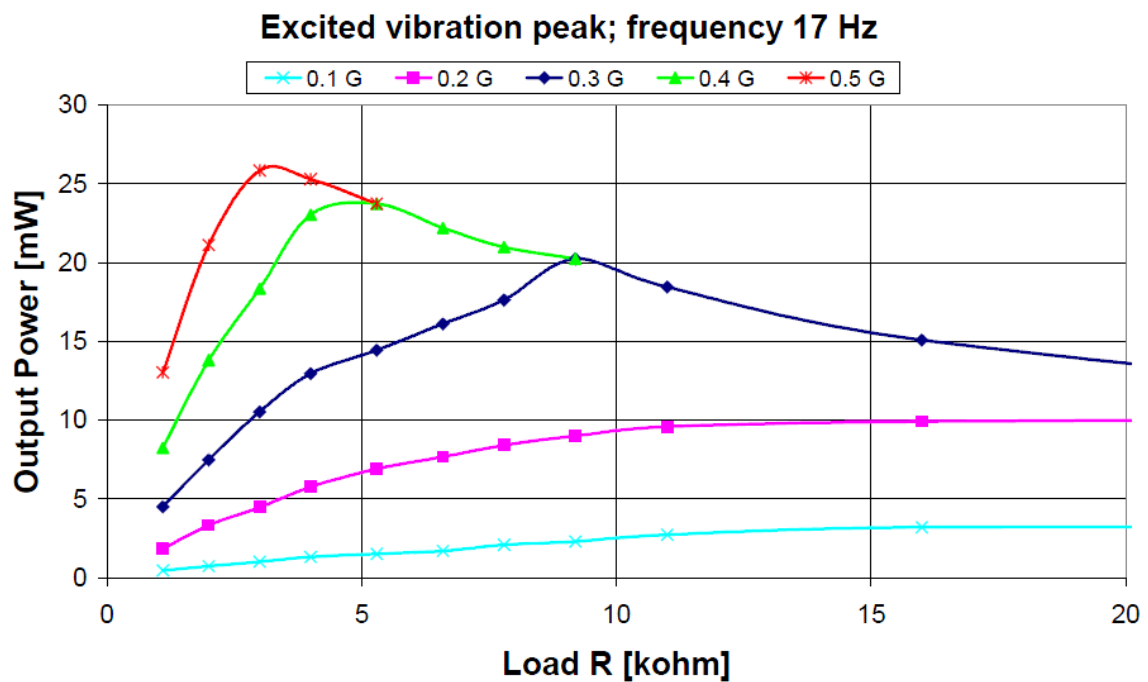
## 4.2. Parametre a charakteristiky vibračného generátora

Podľa článkov [2], [3] a nasledovných grafov na obr. 4.3 a 4.4, pre parametre dané tabuľkou 4.1 je vibračný generátor schopný účinne pracovať pre zrýchlenia okolitých vibrácií od 0.1 – 1 G, pričom veľkosť generovaného výkonu sa pohybuje v intervale 2 – 25 mW pre rezonančnú frekvenciu 17 Hz a optimálnu záťaž 3 – 15 kΩ. Takýto výkon je postačujúci napr. na napájanie teplotného senzora na leteckých dopravných prostriedkoch, k čomu bol generátor primárne vyvíjaný.

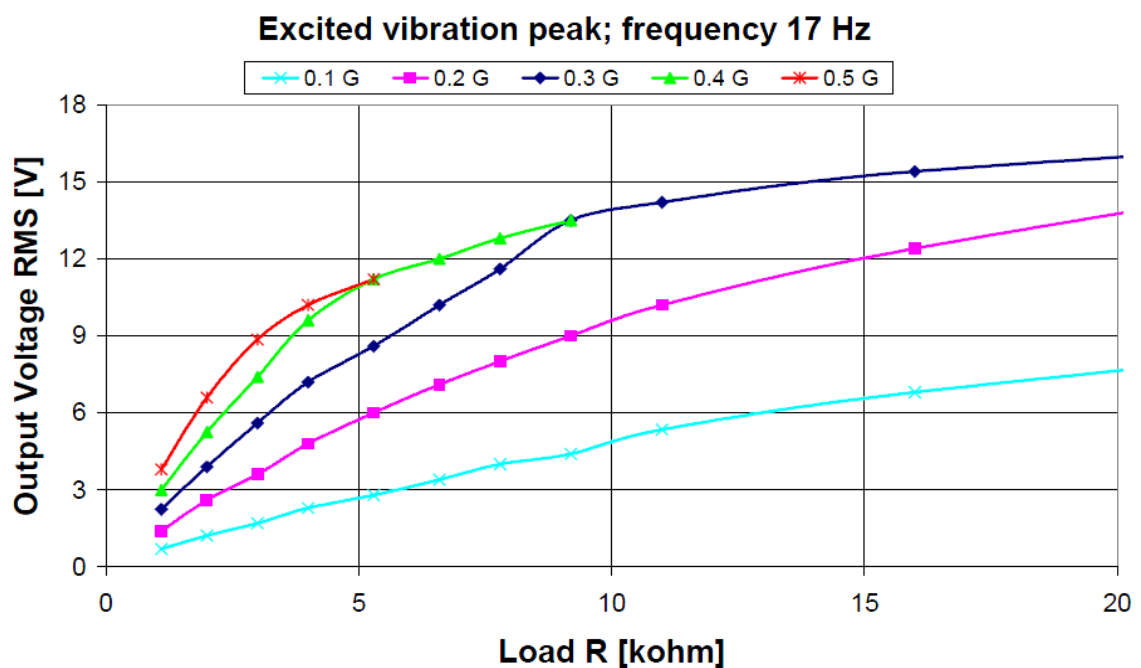
| <i>Parameter (Condition)</i>                              | <i>Value</i> | <i>Unit</i>      |
|---|--------------|------------------|
| Weight  | 135          | g                |
| Volume 50x40x40 mm  | 80           | cm <sup>3</sup>  |
| Working Frequency   | 17           | Hz               |
| Coil (enamelled copper wire with diameter 0.05 mm)        | 2000         | turns            |
| Inner Resistance of Coil                                  | 1600         | Ω                |
| Output Voltage DC (vibration 0.3 G peak sin; load 9.2 kΩ) | 13.5         | V <sub>rms</sub> |
| Output Power (vibration 0.3 G peak sin; load 9.2 kΩ)      | 20           | mW               |
| Optimal Load (it depends on level of vibration)           | 3 – 15       | kΩ               |
| Maximal Output Power (load 3 kΩ; 0.5 G peak and higher)   | 26           | mW               |

Tabuľka 4.1: Základné parametre vibračného generátora.  
Prevzaté z: [2]





Obrázok 4.3: Závislosť výstupného výkonu na veľkosti záťaže pri rezonančnej frekvencii pre rôzne hodnoty zrýchlenia vibrácií.  
Prevzaté z: [2]



Obrázok 4.4: Závislosť výstupného napätia na veľkosti záťaže pri rezonančnej frekvencii pre rôzne hodnoty zrýchlenia vibrácií.  
Prevzaté z: [2]

## 5. Power management

Power management systémy sa ako špeciálna skupina elektroniky zaoberajú predovšetkým reguláciou DC napätia a jeho prispôbením pre napájanie rôznych druhov elektronických zariadení, zabezpečujú efektívne využívanie energie dodávanej zdrojom a jej prípadné uskladnenie v pripojených akumuláčnych článkoch a často zahŕňajú aj battery management – systémy správy energie v týchto článkoch pre rôzne pracovné režimy.

### 5.1. Power management zariadenia a princíp ich činnosti

Na základe zamerania našej práce sa tieto zariadenia dajú rozdeliť do 5 hlavných skupín:

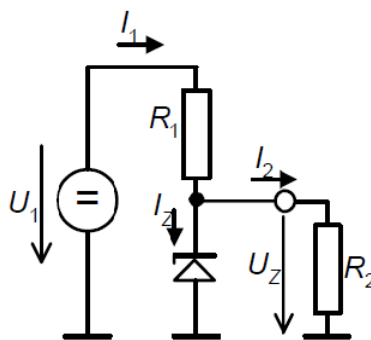
- lineárne regulátory
- DC-DC prepínacie regulátory
- nábojové pumpy
- power management integrované obvody
- systémy správy batérií

#### 5.1.1. Lineárny regulátor (Linear Regulator):

Jeho účelom je udržiavať ustálenú hodnotu napätia na výstupe, čo je zabezpečené tým, že regulátor obsahuje napäťový delič s premenlivým odporom - regulačným prvkom (tranzistorom, diódou), ktorý sa mení na základe odporu pripojenej záťaže. Tento druh regulátora však dokáže len znižovať hodnotu napätia zo vstupu na výstup. Existujú tri typy týchto regulátorov:

##### Paralelný regulátor (Shunt Regulator):

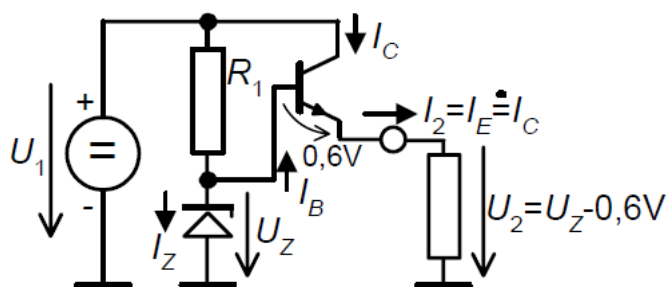
Vychádzame zo zdroja [4]. Napäťový delič obsahuje rezistor a regulačný prvok zapojený paralelne so záťažou. Ak by malo dôjsť k tomu, že by napätie na výstupe dosahovalo príliš vysoké hodnoty (v dôsledku zmeny odporu záťaže), regulačný prvok zníži svoj odpor, vzrastie prúd, ktorý ním tečie a následne sa na rezistore v deliči zvýši napätie a výstupné napätie zostane preto nezvýšené. Ak by malo výstupné napätie dosahovať naopak príliš nízke hodnoty, odpor regulačného prvku narastie, prúd klesne a napätie na výstupe sa nezmení. Na obr. 5.1 je znázornená najjednoduchšia schéma zapojenia takéhoto regulátora, ktorý ako regulačný prvok využíva Zenerovu diódu.



Obrázok 5.1: Základné zapojenie paralelného regulátora.  
Prevzaté z: [4]

### Sériový regulátor (Series Regulator):

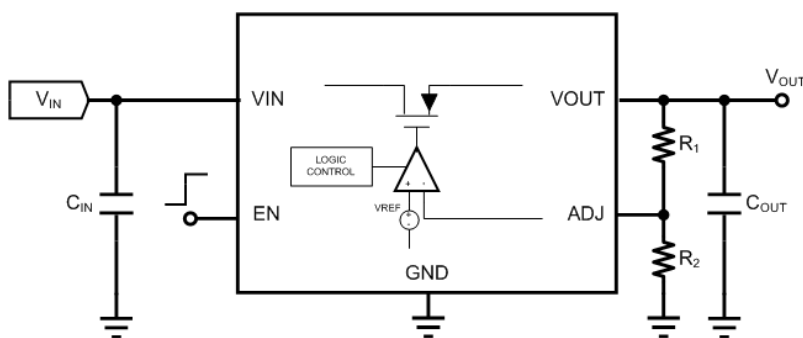
Podľa [4] je tento regulátor založený na paralelnom regulátore so Zenerovou diódou, avšak do série so záťažou je pridaný tranzistor vo forme emitorového sledovača pracujúci v lineárnej oblasti, ktorý plní funkciu regulačného prvku (správa sa ako premenlivý rezistor). Dióda je pripojená na vstup sledovača s veľkým vstupným odporom, ktorý je požadovaný z dôvodu dobrej regulácie napätia. Základná schéma zapojenia je znázornená na obr. 5.2.



Obrázok 5.2: Základné zapojenie sériového regulátora.  
Prevzaté z: [4]

### LDO regulátor (Low Dropout Regulator):

Vychádzajúc z [5] a [6], LDO regulátor je špeciálny prípad lineárneho regulátora, ktorý na svoju funkciu vyžaduje malé rozdiely vstupného a výstupného napätia. Medzi dva najdôležitejšie členy tohto typu regulátora patria výkonový FET (Field-Effect Transistor) a neinvertujúci diferenciálny zosilovač (obr. 5.3). Zosilovač sleduje na svojich vstupoch referenčné napätie a časť výstupného napätia z odporového deliča a ak by malo výstupné napätie vzhľadom k napätiu referenčnému príliš vzrásť, energia dodávaná do FET sa zmení tak, aby výstupné napätie zostalo konštantné.



Obrázok 5.3: Základné zapojenie LDO regulátora.  
Prevzaté z: [6]

Lineárne regulátory sa uprednostňujú v aplikáciách s menšími záťažami a tiež tam, kde sú malé rozdiely medzi vstupným napätím a požadovaným výstupným napätím. Ich výhodou je pomerne jednoduché zapojenie elektronických obvodov, nízky šum a rýchla odozva na signál.

Nevýhodou je, že tranzistor reguluje výstupné napätie pomocou premeny elektrickej energie na teplo, čím vznikajú pri tomto zapojení značné energetické straty, a teda účinnosť regulátorov je pomerne nízka.

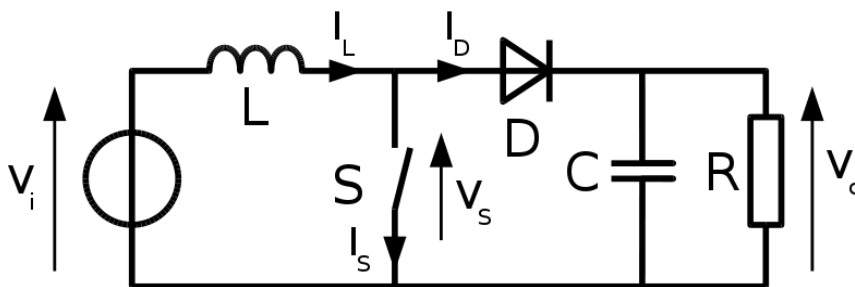
### 5.1.2. DC-DC prepínací regulátor (DC-DC Switching Regulator):

Princípom funkcie je regulácia výstupného napätia prepínaním zapojených akumulčných prvkov (induktor, kapacitor) a tým vytváranie rôznych elektronických zapojení. Ako prepínač sa používa napr. tranzistor, ktorý nemá ideálne žiadny odpor, keď je zopnutý, a netečie do neho žiadny prúd, keď je vypnutý, a preto sú tieto regulátory teoreticky schopné dosahovať až 100 % účinnosť. Prepínače sú ovládané buď pomocou pulzne-šírkovej modulácie (Pulse-Width Modulation, PWM), alebo pomocou pulzne-frekvenčnej modulácie (Pulse-Frequency Modulation, PFM), v závislosti na pripojenej záťaži.

Existujú tri hlavné typy týchto regulátorov:

#### Zvyšujúci regulátor (Step-Up Regulator, Boost Converter):

Z publikácií [5], [7] vyplýva, že tento regulátor produkuje na výstupe väčšie napätie ako na vstupe, pričom v základnom zapojení využíva diódu a tranzistor ako prepínač a minimálne jeden akumulčný prvok. Obr. 5.4 vhodne posluží na vysvetlenie princípu funkcie tohto regulátora: v zopnutom stave prepínača induktor uschová energiu zo zdroja vstupného napätia a obvodom tvoreným induktorom, prepínačom a zdrojom prechádza prúd. Keď je spínač vypnutý, energia uchovávaná v induktore prudko klesne, prúd sa zmení a induktor sa tejto zmene snaží odolať prostredníctvom zmeny svojej polarity. Prúd začne tečť skrz diódu do záťaže a začne nabíjať kapacitor, ktorý plní v obvode funkciu filtra zabezpečujúceho vyhladenie výstupného napätia. Teraz sú napätie na induktore a vstupné napätie zapojené sériovo, preto dohromady vytvoria na záťaži väčšie napätie, ako bolo pôvodné napätie na vstupe.

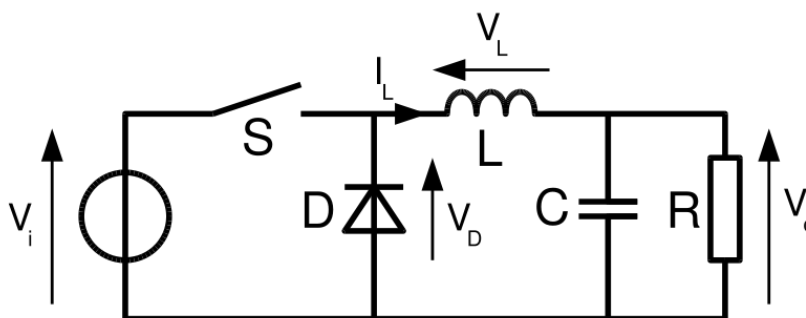


Obrázok 5.4: Základné zapojenie zvyšujúceho regulátora.

Prevzaté z: [20]

### Znižujúci regulátor (Step-Down Regulator, Buck Converter):

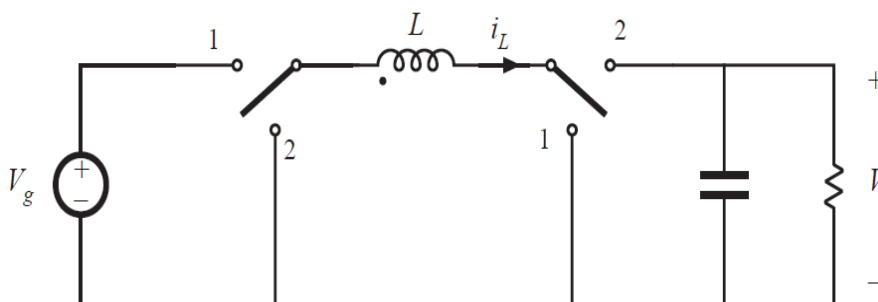
Opäť vychádzame z [5] a [7]. Regulátor produkuje na výstupe menšie napätie ako na vstupe, jeho zapojenie a funkcia sú obdobné ako u zvyšujúceho regulátora, pričom využíva rovnaké elektronické prvky (obr. 5.5). Keď je spínač zapnutý, dióda je vzhľadom k zdroju napätia zapojená v závernom smere, takže skrz ňu nemôže tiecť žiadny prúd, takže tečie cez induktor do záťaže a kapacitora. Napätie na induktore je v tomto prípade dané rozdielom napätí zdroja a záťaže. Keď je spínač vypojený, dióda je zapojená v priepustnom smere, a tak vytvára uzatvorený obvod spoločne s induktorom a záťažou a prúd klesá. Napätie na záťaži má v tomto prípade rovnakú veľkosť ako na induktore, pretože zdroj vstupného napätia je vypojený z obvodu. Napätie na výstupe je teda menšie ako je napätie na vstupe. Zapojený kapacitor v tomto regulátore taktiež plní úlohu filtra vyhladzujúceho výstupné napätie.



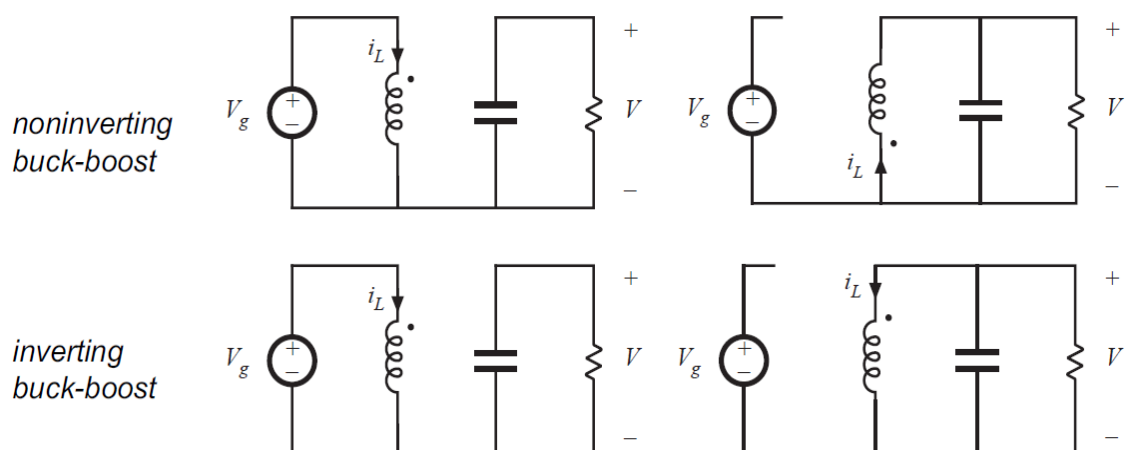
Obrázok 5.5: Základné zapojenie znižujúceho regulátora.  
Prevzaté z: [21]

### Znižujúci / Zvyšujúci regulátor (Buck-Boost Converter):

O tomto type pojednáva [7] a [8]. Tento regulátor je schopný zabezpečiť na výstupe buď vyššie alebo nižšie napätie ako na vstupe, a to v pomerne veľkom rozsahu. Podľa toho, či regulátor na výstupe invertuje alebo neinvertuje napätie, rozoznávame invertujúci a neinvertujúci regulátor (obr. 5.7). Keď sú spínače v polohe 1, energia zo zdroja je akumulovaná v induktore. V prípade, že sa spínače nachádzajú v polohe 2, zdroj vstupného napätia je odpojený a induktor dodáva energiu skrz kapacitor na výstup (obr. 5.6).



Obrázok 5.6: Základné zapojenie neinvertujúceho buck-boost regulátora.  
Prevzaté z: [8]



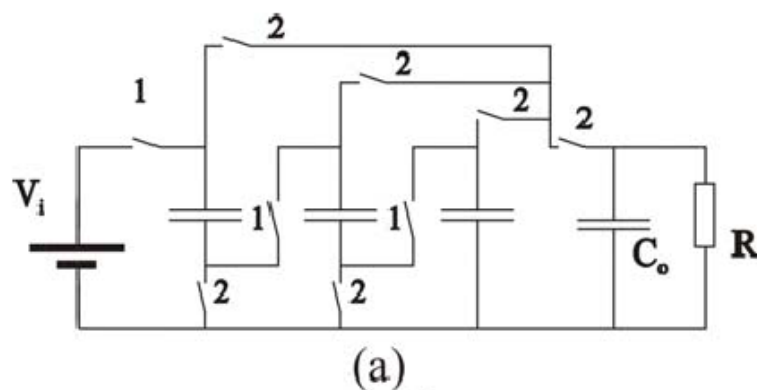
Obrázok 5.7: Porovnanie zapojenia neinvertujúceho a invertujúceho buck-boost regulátora v prípade spínača v polohe 1 a 2.  
Prevzaté z: [8]

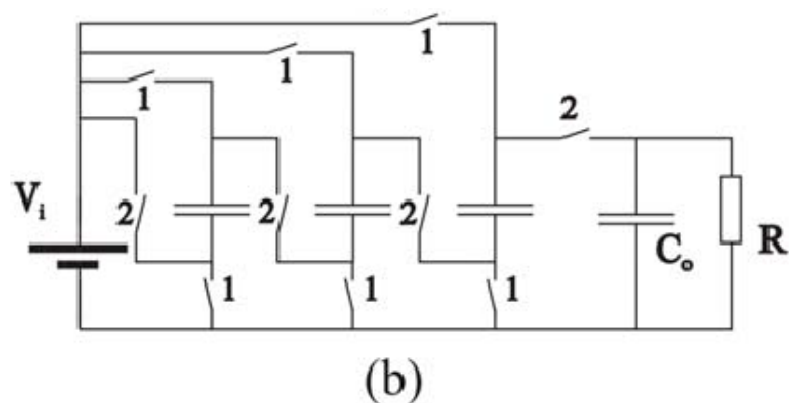
DC-DC prepínacie regulátory majú výhodu vysokej účinnosti, majú malé rozmery a váhu a pri regulácii napätia vytvárajú menej tepla - majú menšie straty ako lineárne regulátory.

Ich nevýhodou je naopak zložitejšie zapojenie elektronických obvodov a generácia šumu, ktorý musí byť potlačený kvalitným filtrom pre bezproblémovú funkčnosť.

### 5.1.3. Nábojová pumpa (Charge Pump, Switched-Capacitor Regulator):

Nábojové pumpy sú podľa [5], [7] neindukčné prepínacie regulátory, ktoré nabíjajú kapacity a prepínajú ich medzi sebou v pravidelných cykloch a tým dokážu plniť funkciu buck, boost a buck-boost regulátorov. Na obr. 5.8 je znázornený princíp funkcie buck a boost nábojovej pumpy.





Obrázok 5.8: Základná schéma zapojenia a vysvetlenie princípu funkcie  
 (a) buck (sériovo-paralelnej) nábojovej pumpy  
 (b) boost (paralelne-sériovej) nábojovej pumpy  
 Prevzaté z: [22]

Nábojové pumpy sa javia ako optimálne riešenie pre aplikácie, kde je požadovaný nízky výkon, jednoduchosť zapojenia a nižšia cena oproti nákladnejším klasickým prepínacím regulátorom využívajúcim induktory.

Medzi ich nevýhody patrí to, že charakteristikou zmeny napätia u kapacitorov je exponenciálna funkcia, a preto nedokážu náhle meniť hodnotu napätia – majú pomalšiu odozvu.

V tabuľke 5.1 je zobrazené porovnanie jednotlivých druhov regulátorov spolu s AC-DC usmerňovačom.

|                                  | DC-DC linear | DC-DC C-based | DC-DC L-based | AC-DC     |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------|
| <b>Power losses</b>              | High         | Moderate      | Low           | Moderate  |
| <b>DC accuracy</b>               | High         | Low           | High          | Low       |
| <b>AC accuracy (speed)</b>       | High         | Low           | Moderate      | Low       |
| <b>Control</b>                   | One loop     | Open loop     | Two loops     | Open loop |
| <b>Buck <math>V_{IN}</math></b>  | Yes          | Yes           | Yes           | No        |
| <b>Boost <math>V_{IN}</math></b> | No           | Yes           | Yes           | No        |

Tabuľka 5.1: Porovnanie vlastností lineárnych (DC-DC linear) a prepínacích (DC-DC L based) regulátorov, nábojových púmp (DC-DC C-based) a AC-DC usmerňovačov.  
 Prevzaté z: [5]

#### **5.1.4. Power management integrované obvody (PMIC):**

Tieto integrované obvody zahŕňajú v sebe vyššie spomínané regulátory často aj s funkciou správy batérií a managementom energie, a to všetko v čípe malých rozmerov, teda odpadá vytváranie elektronických obvodov prostredníctvom diskrétnych súčiastok. Z dôvodu kompaktnosti sa hodia predovšetkým pre aplikácie s komponentmi malých rozmerov, často využívajúcimi batérie a akumulčné články na svoju prevádzku.

#### **5.1.5. Systémy správy batérií (Battery Management Systems):**

Systémy managementu batérií zabezpečujú hlavne monitorovanie stavu batérií (napr. stav nabitia/vybitia, životnosť), správu dodávanej a vydávanej energie (napr. v prípade viacerých akumulčných článkov zabezpečenie, aby bola v prvom rade energia odčerpávaná z najviac nabitých článkov) a ochranu pred rôznymi nežiaducimi vplyvmi, ako napr. nebezpečná hladina teploty, napätia, prúdu. Používajú sa prevažne v podobe integrovaných obvodov, často sú začlenené už priamo do obvodov power management systémov.



## 6. Energy storage

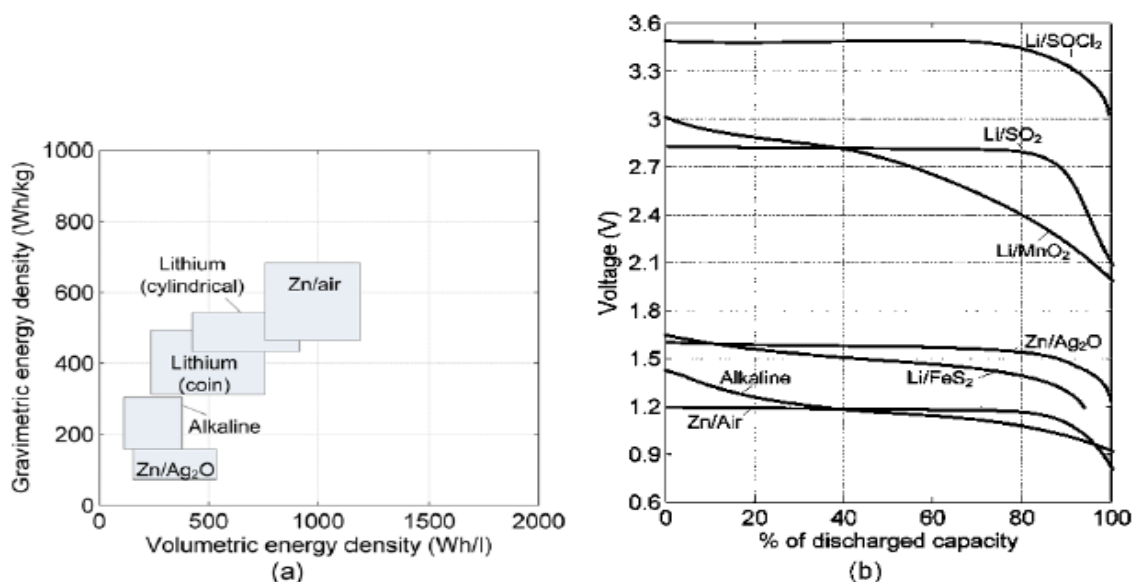
Väčšina power management systémov v sebe zahŕňa nielen vyššie spomínanú elektroniku, ale aj rôzne druhy akumuláčnych prvkov. Tie slúžia buď ako primárny zdroj elektrickej energie, alebo sú použité na uskladnenie energie v prípade, keď napájané prístroje nie sú v pracovnom režime, resp. keď využívajú len časť energie, ktorá je dodávaná zdrojom. Tieto prvky následne môžu plniť funkciu záložného zdroja energie v čase, keď primárny zdroj nedodáva elektrickú energiu alebo môžu podporiť napájanie svojou akumulovanou energiou vtedy, keď primárny zdroj nedokáže sám poskytnúť dostatok elektrickej energie potrebnej na správny chod napájaného prístroja. Všeobecne sa dajú akumuláčne prvky vhodné pre energy harvesting systémy rozdeliť na 4 hlavné skupiny (na základe anglického názvoslovía):

- primárne batérie – nedajú sa nabíjať
- sekundárne batérie – dajú sa nabíjať
- superkapacity
- batérie s tenkým filmom – špeciálny druh sekundárnych batérií

### 6.1. Primárne batérie (Primary Batteries, Non-Rechargeable Batteries)

Tieto batérie sa v súlade s [7] dajú rozdeliť podľa chemických prvkov, ktoré obsahujú, na:

- alkalické (Alkaline, Zn,  $\text{MnO}_2$ ) – najpoužívanejší typ primárnych batérií, napr. v diaľkových ovládaniach
- lítiové (Lithium-based, Li) – vhodné v aplikáciách, kde je potrebný dlhý život batérie a nízka hladina samovybíjania, napr. kardiostimulátory
- zinko-vzduchové (Zinc-air) – používané napr. v načúvacích zariadeniach
- striebro-oxidové (Silver-oxide, Zn,  $\text{Ag}_2\text{O}$ ) – používané prevažne v kalkulačkách, hodinkách



Obrázok 6.1: (a) Objemová (volumetric) a hmotnostná (gravimetric) hustota energie pre rôzne druhy primárnych batérií

(b) Priebehy napätí jednotlivých druhov pri vybíjaní v závislosti na kapacite

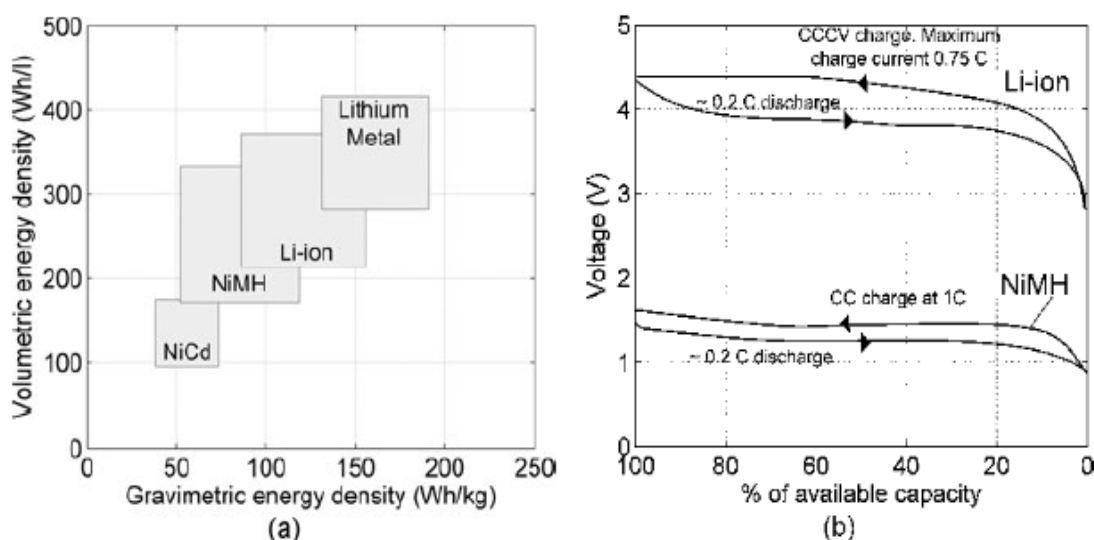
Prevzaté z: [7]

Ako najvýhodnejšie sa javia lítiové primárne batérie, ktoré sa okrem dostatočnej hustoty energie a vhodným priebehom napätia pri vybíjaní (vyplývajúcich z obr. 6.1) vyznačujú aj prijateľnou hodnotou vnútornej impedancie rádovo v stovkách m $\Omega$ , širokým rozsahom prevádzkovej teploty a dlhou životnosťou.

## 6.2. Sekundárne batérie (Secondary Batteries, Rechargeable Batteries)

Vychádzajúc z [7], existujú tri základné druhy sekundárnych batérií pre energy harvesting:

- lítiové (Lithium-based, Li-ion alebo Li polymer) - najpoužívanejší typ sekundárnych batérií, napr. v spotrebnej elektronike
- nikel-kadmiové (NiCd) - používané napr. v zdravotníckej technike a vzhľadom na svoju odolnosť voči vibráciám aj v strojoch, ktoré sú vystavené častým vibráciám
- nikel-metal hydridové (NiMH) - ekologickejšia alternatíva k NiCd batériám, keďže neobsahujú kadmium, ktoré je škodlivé pre životné prostredie



Obrázok 6.2: (a) Objemová (volumetric) a hmotnostná (gravimetric) hustota energie pre rôzne druhy sekundárnych batérií  
(b) Priebehy napätí jednotlivých druhov pri nabíjaní a vybíjaní v závislosti na kapacite  
Prevzaté z: [7]

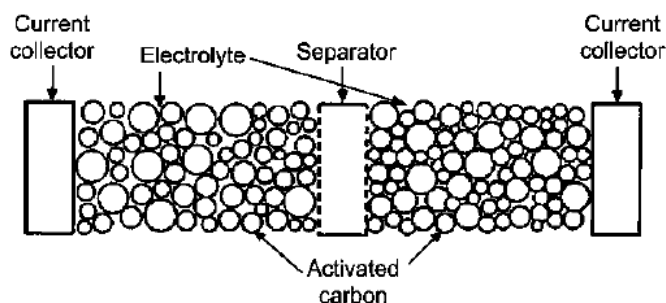
Ako najvhodnejšia voľba sa ukazujú lítiové batérie, ktoré poskytujú najvyššiu hustotu energie (obr. 6.2), vysokú hodnotu napätia vďaka netekutému elektrolytu, ponúkajú kompaktnšie rozmery a nízku mieru samovybíjania.

### 6.3. Superkapacity (Supercapacitors, Ultracapacitors)

Z informácií uvedených v [7] vyplýva, že tieto kapacity (nazývané tiež Electric Double-Layer Capacitors, EDLC) sú tvorené elektródami z aktivovaného uhlíka s veľkou plochou, ktoré sú vo vzájomnej vzdialenosti často na úrovni veľkosti molekúl. Na rozdiel od klasických kapacitorov nemajú elektródy oddelené dielektrikom a výmena nábojov prebieha v iónovej absorbčnej vrstve na povrchu jednotlivých elektród nasýtených elektrolytom. Na obr. 6.3 je pre lepšiu predstavu znázornená štruktúra takéhoto superkapacitora.

Medzi ich výhody patria vyššie hodnoty kapacity v porovnaní s obvyčajnými kapacitormi a väčšie hustoty výkonu spolu s nižšími vnútornými impedanciami v porovnaní so sekundárnymi batériami. Ak sú skladované vo vybitom stave, majú neobmedzenú trvanlivosť a ak pracujú pri napätí pohybujúcom sa okolo ich nominálneho napätia, ich životnosť sa skraca len veľmi pomaly.

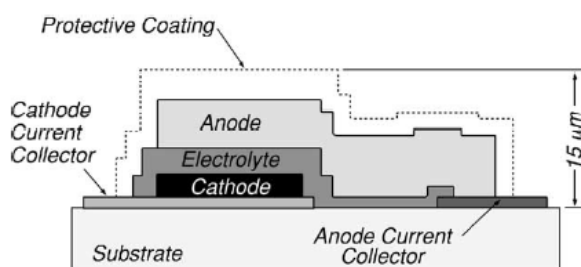
Nevýhodou je fakt, že napätie na superkapacitore klesá lineárne s hladinou jeho vybitia, čím vzrastajú nároky na použitý power management systém. Taktiež sú v porovnaní s ostatnými akumuláčnymi prvkami finančne nákladnejšie.



Obrázok 6.3: Štruktúra superkapacitora.  
Prevzaté z: [7]

### 6.4. Batérie s tenkým filmom (Thin Film Batteries)

Podľa článku [9] je tento druh batérií podobný sekundárnym Li-ion batériám, avšak namiesto tekutého elektrolytu obsahuje pevný polymérový elektrolyt, ktorý zabezpečuje vyššie hustoty energie a je schopný prispôbiť sa tvaru batérie. Tieto batérie navyše ponúkajú vyššie hodnoty výstupného napätia a dlhšiu výdrž v pracovnom režime než sekundárne batérie a taktiež sú kompaktnějšíe, keďže dosahujú hrúbku rádovo niekoľko mikrometrov.



Obrázok 6.4: Prierez batériou s tenkým filmom.  
Prevzaté z: [9]

## 7. Prehľad power management systémov pre vibračné generátory

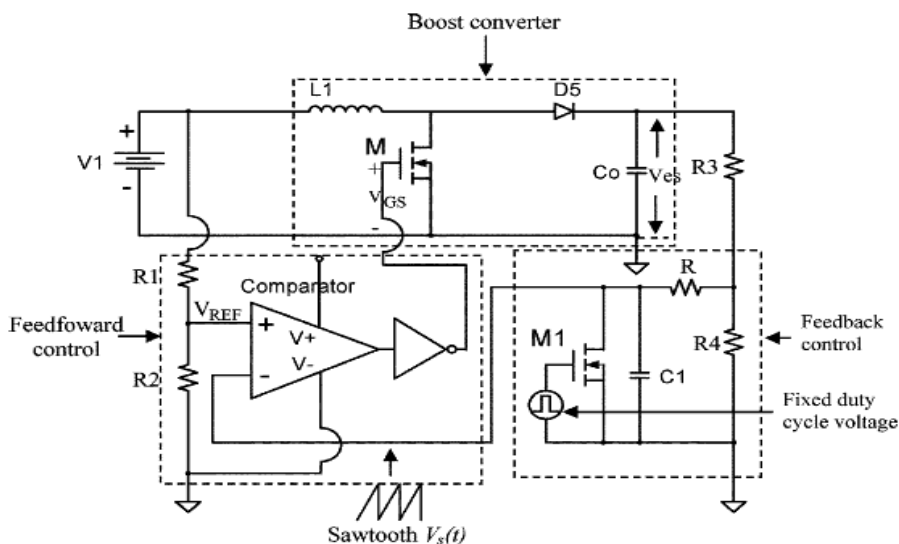
Táto kapitola je venovaná prehľadu systémov, ktoré boli navrhnuté a vyrobené špeciálne pre generátory založené na získavaní energie z vibrácií. Prehľad zahŕňa nielen riešenia pre elektromagnetické generátory, ale aj pre piezoelektrické generátory, ktoré môžu byť po menšom prispôbení bez problémov využité aj v prípade generátorov pracujúcich na elektromagnetickom princípe.

Jedným zo zaujímavých konceptov je prezentovaný v [10]. Power management systém, použitý v súčinnosti s elektromagnetickým generátorom, je tvorený zvyšujúcim DC-DC prepínacím regulátorom, ktorý je pripojený na AC-DC usmerňovač realizovaný Graetz mostíkom, a elementom uskladňujúcim elektrickú energiu, v tomto prípade superkapacitorom. Do obvodu je okrem regulátora zakomponované aj ovládanie kladnou spätnou väzbou (Feedforward Control) a zápornou spätnou väzbou (Feedback Control). Pri výpočte zosilnenia napätia a účinnosti regulátora sa do úvahy berú aj parazitné odpory jednotlivých článkov – cievky, diódy, prepínača a kondenzátora.

Na obr. 7.1 je znázornená kompletná schéma regulátora spolu s feedforward a feedback obvodmi. Feedforward obvod výrazne zlepšuje vlastnosti úpravy napätia regulátorom. Funguje tak, že na vstup komparátora sa privádza referenčné napätie a napätie pílovitého priebehu a ak je hodnota referenčného napätia väčšia ako hodnota pílovitého signálu, hradlo-invertor zabezpečí, že napätie na prepínači M sa zvýši, t.j. prepínač je vypnutý. V opačnom prípade sa na základe rovnakého princípu prepínač zopne.

Z dôvodu rôznych hodnôt napätia na superkapacitore počas pracovného režimu je do tohto power management systému zakomponovaný aj feedback obvod, ktorý umožňuje potrebnú úpravu výstupného napätia regulátora. Keď je spínač M1 zapnutý, napätie pílovitého signálu dosahuje maximálnu hodnotu, ktorá je priamo úmerná napätiu na superkapacitore.

Charakteristikou tohto systému je schopnosť upravovať svoju účinnosť zmenou napätia na elemente uskladňujúcom elektrickú energiu z dôvodu zvyšujúcej sa striedy so zväčšujúcim sa napätím na superkapacitore.

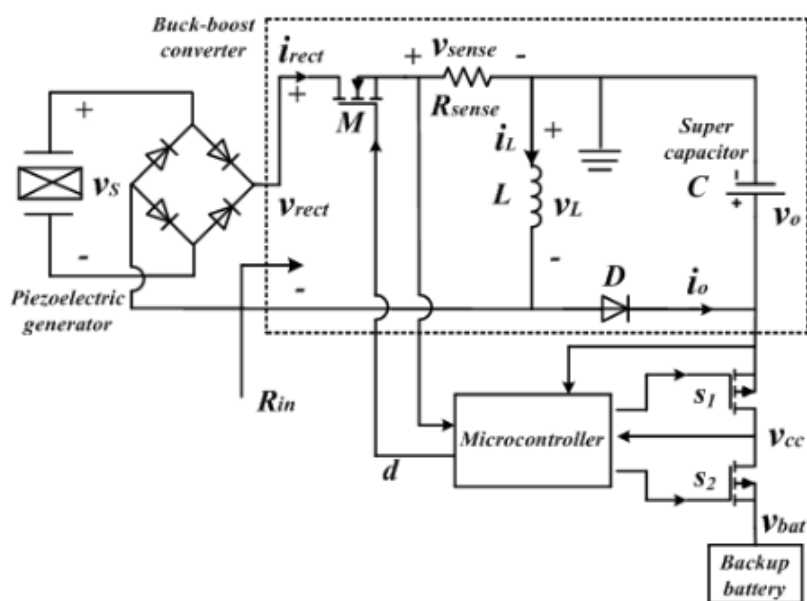


Obrázok 7.1: Celková schéma DC-DC prepínacieho PWM regulátora s feedforward a feedback obvodom.

Prevzaté z: [10]

Článok [11] pojednáva o zapojení na obr. 7.2. Za usmerňovač napätia reprezentovaný klasickým Graetz mostíkom je zapojený buck-boost regulátor, ktorý má na starosti úpravu širokého rozsahu vstupného napätia a zároveň slúži ako komponent na prispôsobenie vstupnej impedancie pre zabezpečenie maximálnej hodnoty získanej energie (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Na zaistenie týchto vlastností je do obvodu zapojený aj mikrokontrolér. Na uskladnenie energie slúži superkapacitor a v zapojení figuruje aj záložná batéria pre počiatočný štart mikrokontroléra, ktorá simultánne slúži aj ako záložný zdroj v prípade nedostatku energie vyrobenej generátorom. Podrobnejšia schéma regulátora ako aj popis jeho funkcie sa nachádzajú v [12], kde je tento power management systém prezentovaný ako univerzálny pre rôzne druhy energy harvesting zariadení.

Keď je superkapacitor na začiatku nabíjaný, nachádza sa na ňom nižšie napätie než je dopredu zvolená jeho horná hranica. Časť obvodu zabezpečujúca MPPT preto začne upravovať striedu prepínačov, aby bola dosiahnutá maximálna hladina energie. Keď je výstupné napätie vyššie ako horná hranica, MPPT časť obvodu sa vypne a v dôsledku dostatočne veľkej získanej energie sa zapne časť majúca na starosti reguláciu výstupného napätia na superkapacitore. Ak je naopak získaná energia nedostatočná, výstupné napätie sa postupne zníži až pod dopredu stanovenú dolnú hranicu a MPPT časť sa znova zapne, aby maximalizovala získavanú energiu.

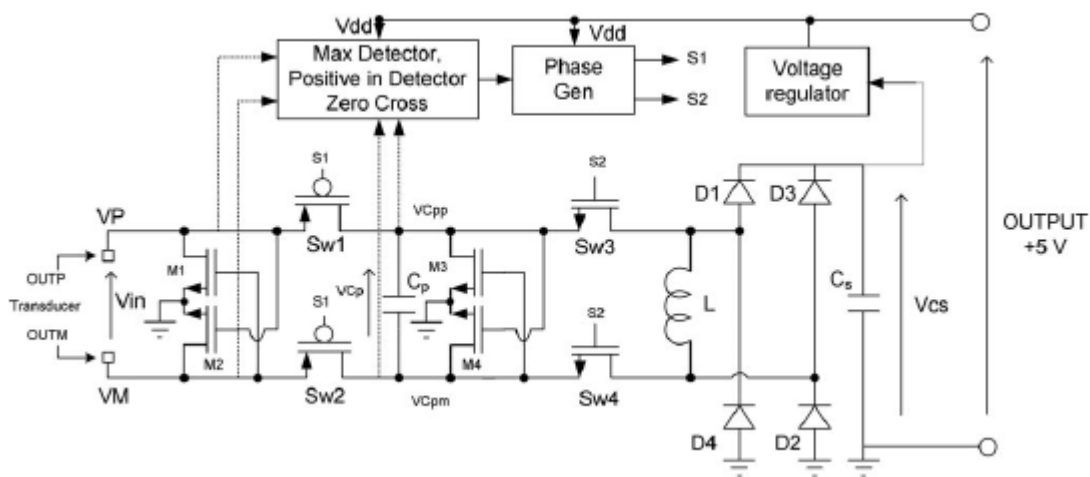


Obrázok 7.2: Schéma power management obvodu.  
Prevzaté z: [11]

V [13] je prezentovaný návrh aktívneho plne autonómneho elektronického systému pre elektromagnetický vibračný generátor. Je použitý boost AC-DC indukčný regulátor, ktorý dokáže spracovať energiu počas kladného a záporného pracovného cyklu aj vtedy, keď je AC napätie vytvorené generátorom menšie ako DC napätie na výstupnom kapacitore/superkapacitore. Tento obvod je tvorený troma časťami: sekciou zabezpečujúcou prevod energie z generátora na kapacitor, sekciou poskytujúcou potrebné signály pre fázový generátor ovládajúci prepínače a sekciou s napäťovým regulátorom.

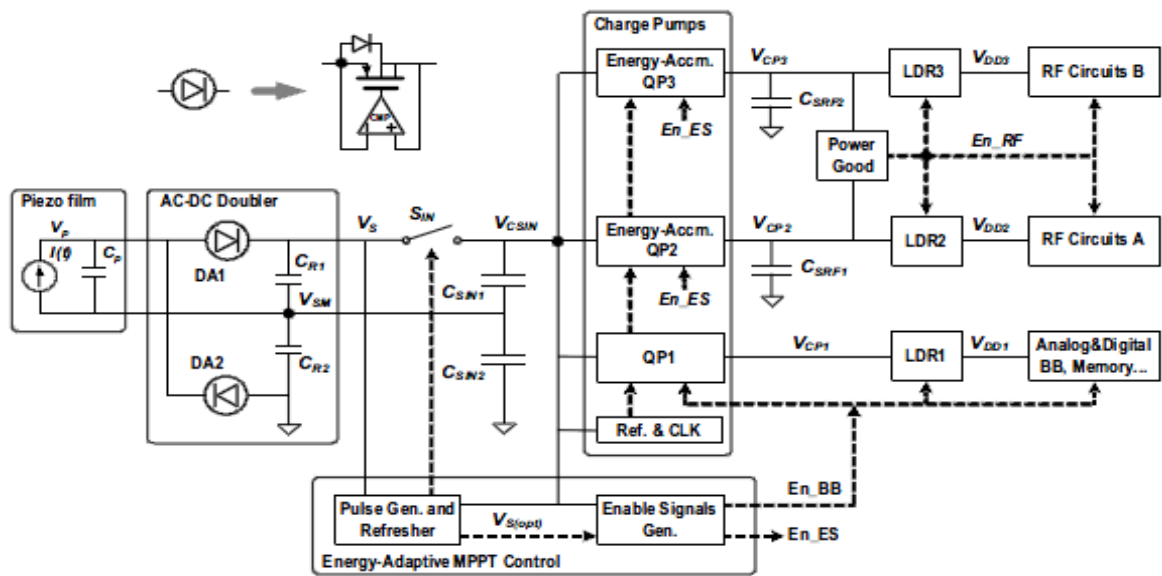
Vychádzajúc z obr. 7.3, tranzistory M1, M2, M3 a M4 vykonávajú funkciu usmerňovačov, ktoré striedavo pripájajú na zem svorky VP a VM a svorky kapacitora  $C_p$ . Keď je na svorkách VP, resp. VM detekované kladné napätie, prepínače Sw1 a Sw2 sa zopnú a tým prepoja kapacitor  $C_p$  so svorkami generátora a kapacitor sa nabije na napätie rovné výstupnému napätiu generátora. Keď toto napätie  $V_{Cp}$  dosiahne maximálnu hodnotu, prepínače Sw1 a Sw2 sa vypnú a zapoja sa prepínače Sw3 a Sw4, ktoré umožnia kapacitoru vybiť sa do induktora.

Maximálne napätie je detekované obvodom zo signálovej sekcie prostredníctvom dvoch filtrov typu horná priepusť (High-Pass Filter), ktoré sú pripojené na svorky kapacitora  $C_p$ . Ich výstup sa porovnáva s elektrickou zemou a keď začne napätie na  $C_p$  klesať, prúd filtračnými kapacitormi je záporný a obvod sa vypne (vypnú sa prepínače Sw1 a Sw2). Keď dôjde k takmer úplnému vybitiu  $C_p$ , obvod zo signálovej sekcie slúžiaci na detekciu nízkeho napätia na kapacitore zložený z dvoch komparátorov vypne prepínače Sw3 a Sw4 a induktor sa začne vybíjať do kapacitora  $C_s$  cez diódy D1, D2 alebo D3, D4 (v závislosti na prúde induktorom). Charakteristikou tohto systému je to, že umožňuje získať väčšie množstvo energie než pri klasickom ukončení pracovného cyklu dosiahnutím maximálneho napätia na kapacitore  $C_p$ .



Obrázok 7.3: Schéma autonómneho power management systému.  
Prevzaté z: [13]

Na obr. 7.4 je znázornená power management jednotka použitá v článku [14]. Je tvorená dvoma polvlnovými AC-DC usmerňovačmi v kaskádnom zapojení, ktoré uskladňujú energiu v dvoch kapacitoroch a zabezpečujú, že výstupné DC napätie je oproti vstupu dvojnásobné. Pre vyššiu účinnosť sú v usmerňovačoch použité aktívne diódy reprezentované tranzistormi. Za usmerňovačmi nasledujú tri nábojové pumpy. QP1 dodáva energiu analógovým a digitálnym obvodom, QP2 a QP3 potom uskladňujú energiu v kapacitoroch, ktoré napájajú rádiové obvody senzora. Výstupy pŕpump sú navyše upravované LDO regulátormi LDR1, LDR2 a LDR3. MPPT jednotka okrem kontroly jednotlivých pŕpump zabezpečuje aj dosiahnutie ideálnej hodnoty výstupného napätia usmerňovača  $V_s$  prepínaním spínača  $S_{IN}$  a porovnávaním napätí  $V_s$  a  $V_p$  pri zatvorenom a otvorenom spínači. Dodatočný Power Good blok sníma napätie na kapacitoroch uskladňujúcich energiu z QP2 a QP3 a posudzuje, či je táto energia postačujúca na napájanie obvodov senzora.

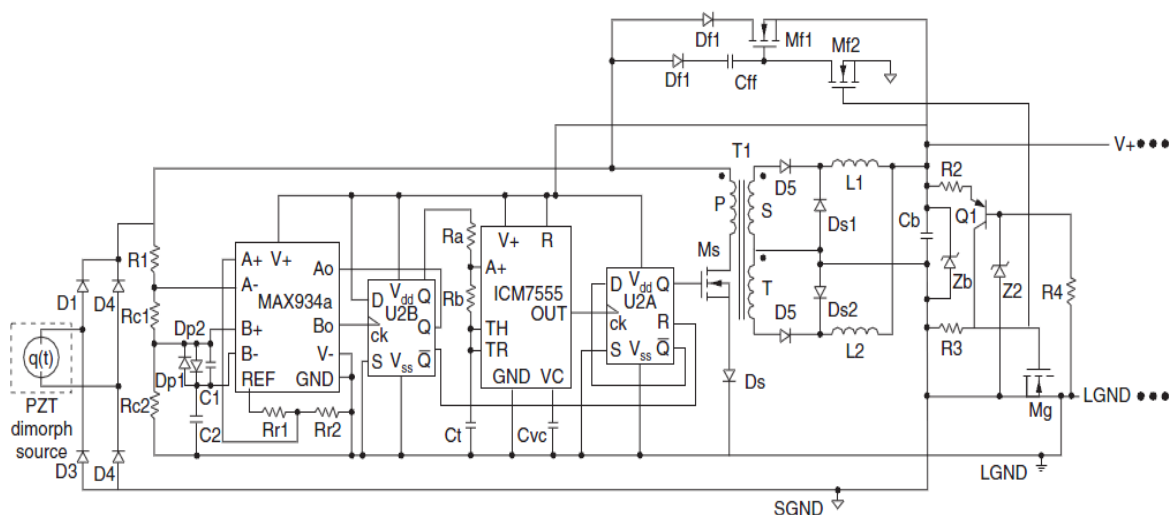


Obrázok 7.4: Zapojenie power management systému spolu so senzorom ako napájaným zariadením.

Prevzaté z: [14]

Mnoho článkov sa odkazuje na koncept publikovaný v [15]. Pojednáva sa tu o dvoch variantoch: jedným je systém s LDO lineárnym regulátorom a druhým je od neho odvodený systém s DC-DC prepínacím regulátorom, ktorý je výhodnejší z hľadiska dosiahnutia vyššej účinnosti.

Obr. 7.5 vhodne posлúži na popis funkcie power management obvodu. Signál z generátora je usmernený diódovým mostíkom D1-D4. Na začiatku sa z dôvodu vypnutého prepínača Q1 vytvorí prostredníctvom vetvy kladnej spätnej väzby prúdová slučka medzi usmerneným signálom zo zdroja a kapacitorom Cb. Diódy Df1, D5, Ds1 a Ds2 zabezpečujú, aby sa kapacitor počas svojho nabíjania zároveň nevybíjal do transformátora T1. Aby sa zaistilo, že na začiatku bude tranzistor Mf1 zopnutý, je na vetve z jeho bázy (Gate) pripojená dióda a kapacitor, ktoré udržiavajú na báze náboj. Keď sa Cb nabije na napätie väčšie, ako je priepustné napätie diódy Z2, tranzistory Q1, Mf2 a Mg sa zopnú. Následne sa vytvorí prúdová slučka medzi Cb a regulačným obvodom. Táto vetva zostane aktívna dovtedy, kým sa napätie na rezistore R3 nezníži na takú hodnotu, ktorá vypne Mg. Potom sa môže energia prenášať skrz tranzistor Ms a transformátor T1. Ms sa zopne, keď napätie zo zdroja dosiahne maximálnu hodnotu a vypne sa, keď je obvodom detekovaná nízka úroveň napätia. Takisto je vypnutý na začiatku procesu, aby transformátor naplno nezaťažil zdroj.

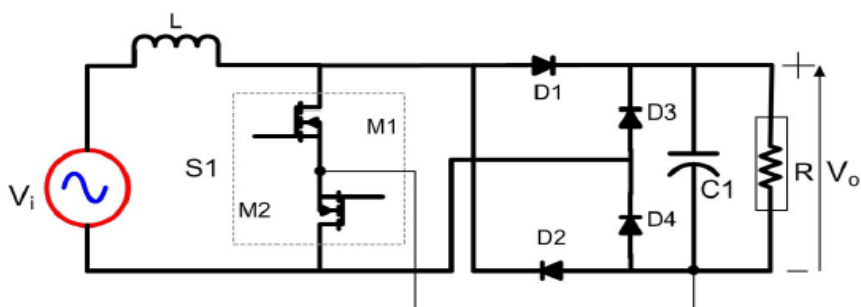


Obrázok 7.5: Časť schémy regulačného power management obvodu.  
Prevzaté z: [15]

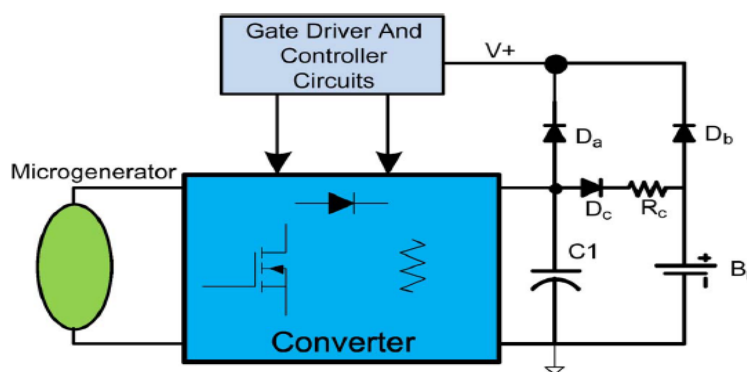


Inovatívne riešenie ponúka článok [16]. Ide o systém s priamym AC-DC boost regulátorom, ktorý využíva cievku elektromagnetického vibračného generátora nielen ako prvok potrebný v procese elektromagnetickej indukcie, ale zároveň ako prvok regulátora, ktorý poskytuje dostatočnú indukciu na jeho operáciu. Tým sa stáva regulátor kompaktnejším, lacnejším a účinnejším. Samotný regulátor funguje na princípe vyplývajúcom z obr. 7.6. Základom tohto obvodu je dvojcestný prepínač S1 zložený z dvoch MOSFET tranzistorov M1, M2 zapojených sériovo so spoločnou bázou (Gate). Takéto zapojenie umožňuje vedenie prúdu v dvoch smeroch a blokovanie obiehajúceho prúdu, keď sú tranzistory vypnuté. V prípade kladnej polvlny napätia zo zdroja sa prepínač S1 najprv zopne, čím sa nabije induktor L. Po vypnutí prepínača induktor začne cez diódy D1 a D4 nabíjať výstupný kapacitor C1. Ak je prítomná záporná polvlna napätia, cyklus sa opakuje, ale tentokrát sa induktor vybíja skrz diódy D2 a D3.

Power management systém, znázornený na obr. 7.7, je ďalej tvorený PI-regulátorom, ktorý zabezpečuje konštantnú hodnotu napätia na výstupe, filtrom typu dolná priepusť (Low-Pass Filter) majúcim na starosti elimináciu harmonického zvlnenia druhého rádu na výstupnom napätí a ďalej komparátorom a generátorom pílovitého signálu – tie zabezpečujú ovládanie prepínačov. Dôležitou súčasťou je aj obvod zaobstarávajúci spúšťanie celého procesu regulácie napätia, ktorý dodá počiatočnú energiu do jednotlivých obvodov, aby mohla byť energia získaná zo zdroja spracovaná. Sám generátor totiž v počiatočnom stave nie je schopný vygenerovať toľko energie, aby mohol napájať jednotlivé obvody. Tento štartovací obvod napája PI-regulátor a ovládanie prepínačov prostredníctvom záložnej batérie  $B_r$  cez diódu  $D_b$ . Keď začne výstupné napätie rásť, dióda  $D_a$  vypne diódu  $D_b$ . Dióda  $D_c$  a rezistor  $R_c$  udržiavajú záložnú batériu nabitú pre ďalšie prípady štartovania celého systému.



Obrázok 7.6: Schéma priameho AC-DC boost regulátora.  
Prevzaté z: [16]



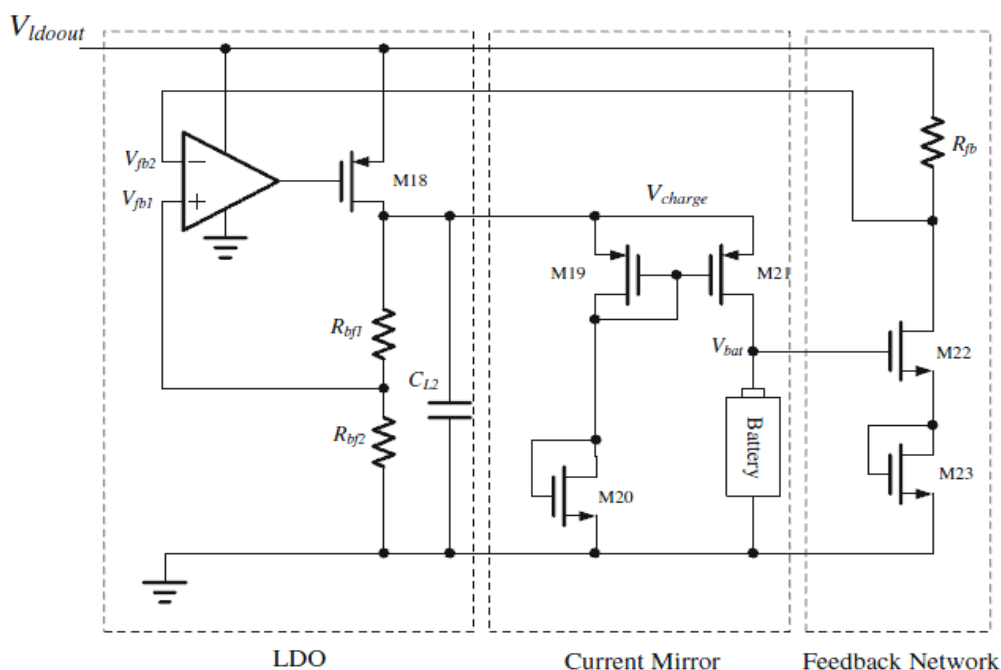
Obrázok 7.7: Celkový power management systém.  
Prevzaté z: [16]

Prevratné riešenie je predstavené v [17]. Systém tu prezentovaný obsahuje hula-hoop menič translačných vibrácií na rotačné, elektromagnetický vibračný generátor a nový power management systém tvorený nábojovou pumpou, obvodom monitorujúcim množstvo akumulovanej energie v kapacitore, LDO regulátorom a nabíjačom Li-ion batérie.

Dvojfázová trojúrovňová nábojová pumpa zabezpečuje nielen premenu napätia z AC na DC, ale zároveň slúži ako boost člen na zvýšenie jeho hodnoty. Je zložená z dvoch identických obvodov, ktoré sa navzájom kombinujú pre dosiahnutie dvojfázového výstupu, zlepšenia zvlnenia napätia a zvýšenia jeho ovládateľnosti. Princíp funkcie jednotlivých obvodov je založený na nabíjaní kapacitorov paralelne a ich vybíjaní sériovo v rámci jedného pracovného cyklu.

Monitorovací obvod je tvorený hysteréznym komparátorom, invertorom a MOSFET prepínačmi. Jeho úlohou je okrem sledovania množstva energie aj napájanie nabíjača batérie. V pohotovostnom režime tento obvod prerušuje dodávku energie na svoj výstup, kým je uskladňujúci kapacitor v obvode nábojovej pumpy nabíjaný. Keď napätie na kapacitore prekročí stanovenú hodnotu, obvod sa prepne do aktívneho módu a umožní kapacitoru vybiť sa, kým neklesne hladina jeho napätia pod danú hranicu, inak sa prepne opäť do pohotovostného režimu.

Nabíjač je tvorený prúdovým zrkadlom a spätnoväzbovým obvodom a je pripojený na LDO regulátor (obr. 7.8). Na začiatku procesu sú prepínače M22 a M23 vypnuté, keď je napätie batérie nižšie ako daná hodnota. LDO regulátor teda poskytuje napätie takmer rovné dodávanému napätiu a vstupný prúd batérie je riadený prúdovým zrkadlom, čo je v podstate zdroj prúdu riadený prúdom. Keď napätie na batérii dosiahne požadovanú hodnotu, M22 a M23 sa zapnú, čím sa zapne obvod so spätnou väzbou a LDO regulátor zníži svoje výstupné napätie na napätie batérie.



Obrázok 7.8: LDO regulátor spolu s nabíjačom Li-ion batérie.

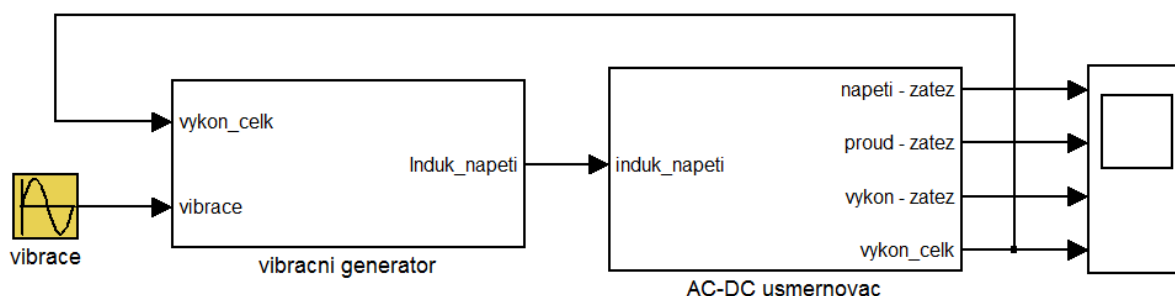
Prevzaté z: [17]

## 8. Analýza rôznych energetických stavov vibračného generátora

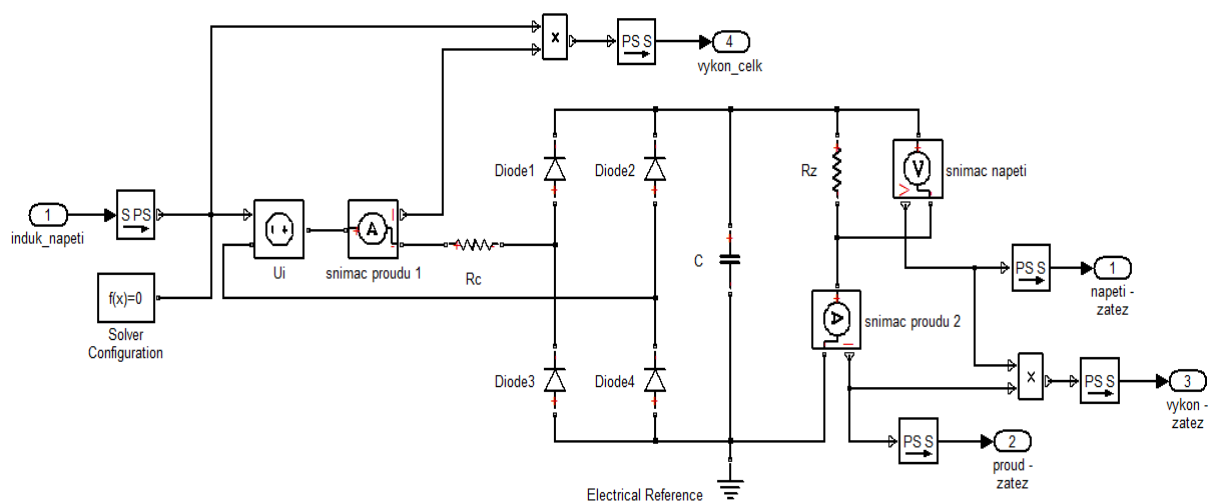
Elektromagnetický vibračný generátor vyvinutý na VUT by mal slúžiť ako zdroj energie pre bezdrôtové snímače pracujúce so vstupnými napätiami v rozmedzí od 1 do 5 V. S ohľadom na tento fakt a na základe výsledkov samotnej simulácie jednotlivých stavov budeme potom postupovať pri návrhu vhodného typu power management systému.

Vychádzajúc z [2] a [3], náš vibračný generátor je naladený na rezonančnú frekvenciu 17 Hz, pri ktorej dosahuje maximálne hodnoty výstupného napätia pre zvolenú veľkosť záťaže a zrýchlenia vibrácií. Preto pri simulácii energetických stavov generátora budeme vychádzať z toho, že generátor bude využívaný na svoju funkciu v prostredí, kde sa vibrácie budú pohybovať v okolí tejto hodnoty. Keďže hodnoty elektrických veličín pre parametre generátora uvedené v kapitole 2 poznáme, pri našej simulácii budeme uvažovať okrem známych hodnôt zrýchlenia vibrácií v rozsahu 0.01 – 0.5 G (pre ktoré je vibračný generátor usposobený) iný počet závitov cievky (1150) a iný priemer drôtu (0.1 mm) pre hodnoty záťaže 3.5, 5, 7 a 10 k $\Omega$ .

Na obr. 8.1 je model, ktorý bol použitý na simuláciu chovania generátora a ktorý reprezentuje reálny generátor s odchýlkou asi 10 %. V bloku nazvanom “vibracni generator” sa nachádza model rezonančného a budiaceho obvodu generátora, ktorý nám bol pre potreby simulácie poskytnutý, zároveň sa tu nachádza aj subsystém, ktorý reprezentuje elektromagnetické tlmenie. V bloku “AC-DC usmernovac” je potom model usmerňovača uvedený v [18], ktorý je ale prerobený pomocou knižnice SimScape (obr. 8.2). Tento model, tvorený komponentmi popísanými v časti 4.1.3. kapitoly 4, je navyše doplnený prevodníkmi signálu Simulink/Simscape a Simscape/Simulink, blokom matematického riešiča a elektrickým uzemnením, bez ktorých by nebol funkčný. Ďalšími časťami modelu sú odpor cievky  $R_c$ , odpor záťaže  $R_z$  a snímače napätia a prúdu, ktoré poskytujú hodnoty meraných veličín.



Obrázok 8.1: Model subsystémov vibračného generátora a AC-DC usmerňovača



Obrázok 8.2: Model AC-DC usmerňovača s Graetzovým mostíkom a filtračným kondenzátorom

## 8.1. Chovanie modelu vibračného generátora pri budení harmonickými vibráciami

Výstupom našej simulácie, ktorá prebiehala za použitia poskytnutého m-file súboru s parametrami generátora a modelu na obr. 8.1, sú hodnoty elektrických veličín pre rôzne rozsahy harmonických vibrácií s frekvenciou rovnajúcou sa rezonančnej frekvencii generátora, t.j. 17 Hz. Tieto hodnoty sú prehľadne uvedené v tabuľke 8.1:

| zrýchlenie vibrácií [G] | odpor zát'aže [k $\Omega$ ] | napätie zát'aže [V] | prúd zát'aže [ $\mu$ A] | výkon zát'aže [ $\mu$ W] | celkový výkon [ $\mu$ W] |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.01                    | 3.5                         | 0.12                | 35                      | 4.2                      | 100                      |
|                         | 5                           | 0.14                | 30                      | 4.2                      | 100                      |
|                         | 7                           | 0.16                | 23                      | 3.7                      | 90                       |
|                         | 10                          | 0.18                | 18                      | 3.2                      | 80                       |

| zrýchlenie vibrácií [G] | odpor zát'aže [k $\Omega$ ] | napätie zát'aže [V] | prúd zát'aže [mA] | výkon zát'aže[mW] | celkový výkon [mW] |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 0.1                     | 3.5                         | 3.0                 | 0.85              | 2.6               | 13.5               |
|                         | 5                           | 3.5                 | 0.70              | 2.5               | 13.5               |
|                         | 7                           | 4.0                 | 0.55              | 2.2               | 13.0               |
|                         | 10                          | 4.4                 | 0.44              | 2.0               | 12.2               |

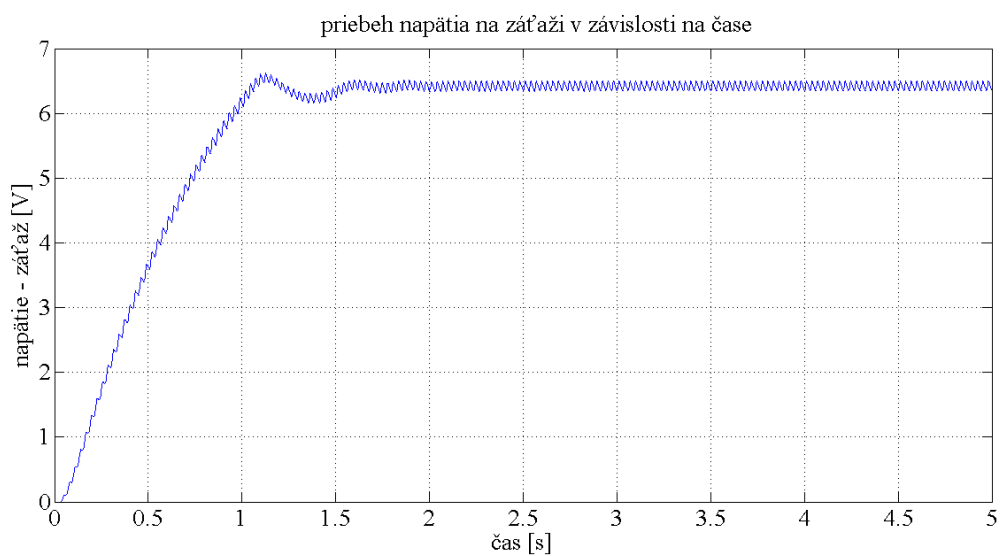
| zrýchlenie vibrácií [G] | odpor zát'aže [k $\Omega$ ] | napätie zát'aže [V] | prúd zát'aže [mA] | výkon zát'aže[mW] | celkový výkon [mW] |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 0.3                     | 3.5                         | 6.4                 | 1.8               | 11.5              | 57                 |
|                         | 5                           | 6.7                 | 1.4               | 9.4               | 46                 |
|                         | 7                           | 7.0                 | 1.0               | 7.0               | 37                 |
|                         | 10                          | 7.1                 | 0.7               | 5.0               | 30                 |

| zrýchlenie vibrácií [G] | odpor zát'aže [k $\Omega$ ] | napätie zát'aže [V] | prúd zát'aže [mA] | výkon zát'aže[mW] | celkový výkon [mW] |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 0.5                     | 3.5                         | 6.4                 | 1.80              | 11.5              | 54                 |
|                         | 5                           | 6.7                 | 1.34              | 9.0               | 44                 |
|                         | 7                           | 6.9                 | 0.98              | 6.8               | 36                 |
|                         | 10                          | 7.1                 | 0.70              | 5.0               | 29                 |

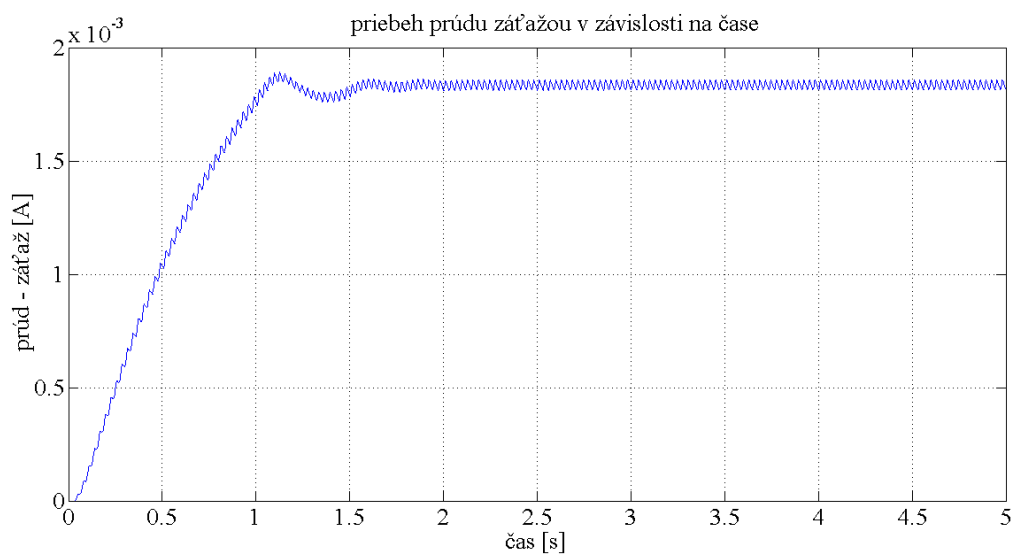
Tabuľka 8.1: Hodnoty veličín získané pri simulácii chovania generátora vystaveného harmonickým vibráciám

Z takmer zhodných výsledkov pre zrýchlenia 0.3 G a 0.5 G vyplýva, že zrýchlenie 0.3 G je hranicou, keď generátor dosahuje maximálne hodnoty výkonu. Nech za touto hranicou akokoľvek ďalej zvyšujeme hodnotu zrýchlenia vibrácií, hodnoty výkonu už ďalej neporastú.

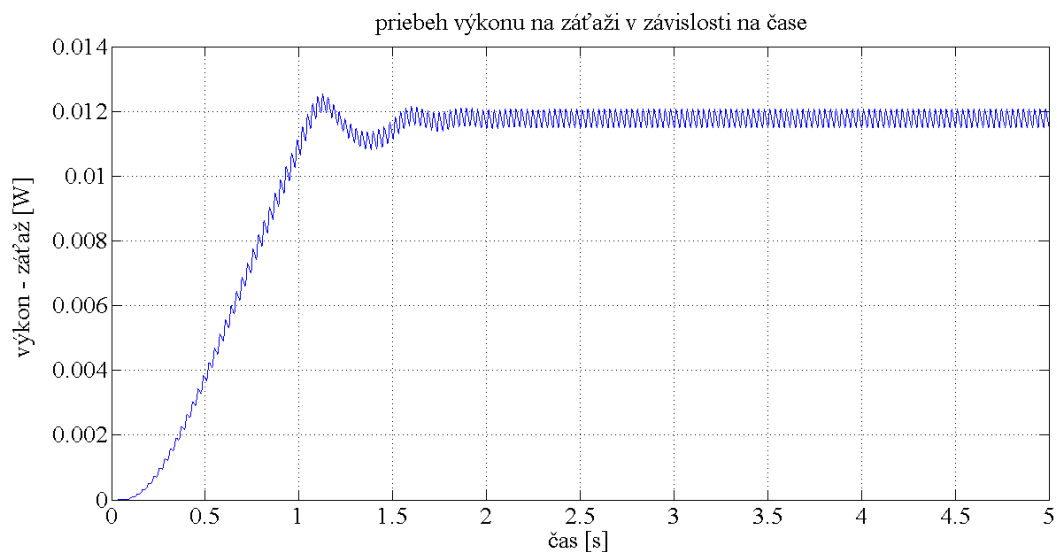
Na obr. 8.3 - 8.6 sú pre názornosť a lepšiu predstavu zobrazené priebehy meraných veličín pri zrýchlení 0.3 G a záťaži 3.5 k $\Omega$ .



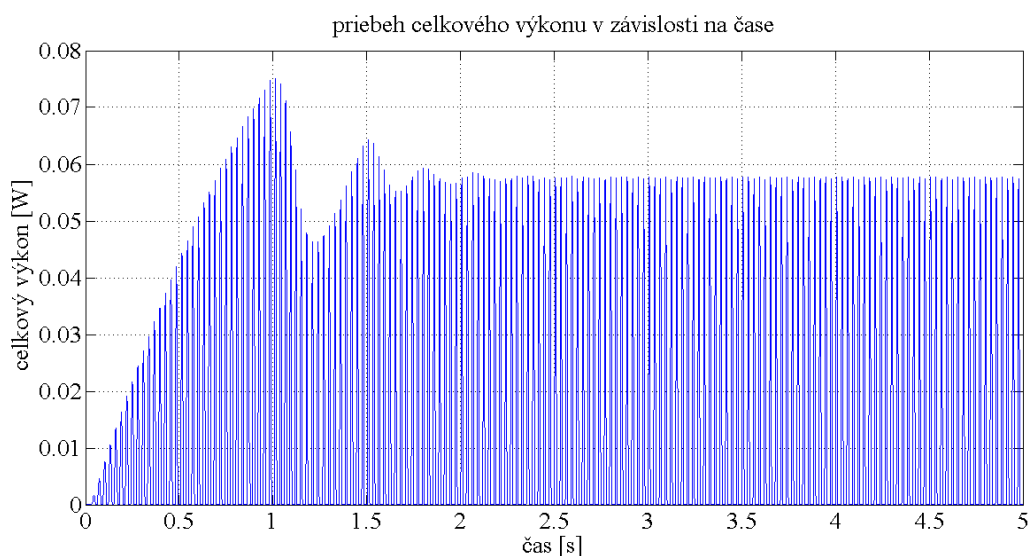
Obrázok 8.3: Priebeh napätia na záťaži v závislosti na čase



Obrázok 8.4: Priebeh prúdu záťažou v závislosti na čase



Obrázok 8.5: Priebeh výkonu na záťaži v závislosti na čase



Obrázok 8.6: Priebeh celkového výkonu v závislosti na čase

Z obr. 8.5 a 8.6 je zrejmé, že generátor pracuje so značnými energetickými stratami, keďže celkový disipatívny výkon je omnoho väčší ako výkon vygenerovaný na záťaži. Práve voľbou vhodnej power management elektroniky, ktorá je primárnym cieľom tejto práce, je energia dodávaná generátorom optimalizovaná a celý systém tak môže dosahovať menšie straty a vyššiu účinnosť.

## 8.2. Voľba komerčnej elektroniky pre jednotlivé energetické stavy

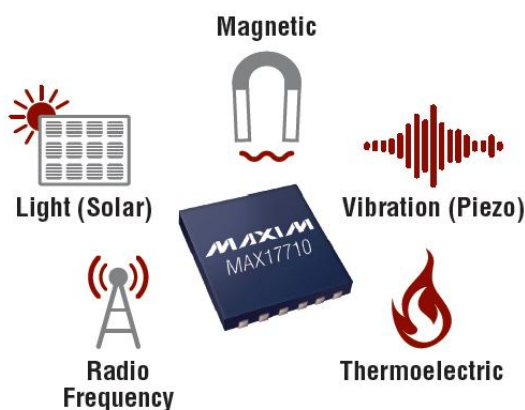
Trh so zariadeniami špecializovanými na energy harvesting nie je veľmi široký, pretože výraznejší záujem a rozvoj technológií súvisiacich s touto oblasťou vzrástol len nedávno. Čoraz viac firiem však postupne pridáva tieto zariadenia do portfólia svojich produktov. Medzi najväčších hráčov na trhu patria spoločnosti Maxim, Linear Technology, Texas Instruments a Cymbet.

Pri voľbe elektroniky vychádzame z toho, že každá hodnota zrýchlenia vibrácií vyžaduje rozdielny druh power management systému, ktorý umožní zabezpečiť vhodnú úpravu dodávanej energie z generátora a zároveň jeho optimálnu prevádzku. Ďalším dôležitým faktorom je efektívnosť premeny energie vytvorenej generátorom a veľkosť použitého systému. Pre našu aplikáciu bude preto vhodnejšie zvoliť power management čipy namiesto samostatných diskretných súčiastok z dôvodu minimalizovania rozmerov celkového energy harvesting systému.

### 8.2.1. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.01 – 0.1 G:

Pre tento rozsah zrýchlenia, vzhľadom na nízke hodnoty generovaného napätia (0.1 – 3 V), bude vhodné použiť systém obsahujúci boost regulátor, ktorý by zvýšil hodnotu vstupného napätia tak, aby bolo vhodné na napájanie bezdrôtových senzorov, t.j. primárnu aplikáciu pre vibračný generátor.

Ako vhodné riešenie sa javí chip MAX17710 od firmy Maxim (obr. 8.7), ktorý je na trhu prvým kompletným riešením power managementu špeciálne určeným pre energy harvesting. Je schopný pracovať so zdrojmi energie s výstupným výkonom v rozmedzí 1  $\mu\text{W}$  – 1 mW, obsahuje step-up regulátor umožňujúci regulovať napätie od úrovne 0.75 V a svoje výstupné napätie ďalej upravuje pomocou nastaviteľného LDO regulátora. Navyše sú jeho súčasťou aj nabíjačka batérií a ich ochrana pred prílišným nabitím a vybitím. To všetko sa nachádza vo vnútri integrovaného obvodu s rozmermi 3 mm x 3 mm x 0.5 mm (dĺžka x šírka x hrúbka). Pre tento systém sú špeciálne odporúčané batérie s tenkým filmom THINERGY od firmy Infinite Power Solutions, s ktorými čip tvorí optimálny power management systém.



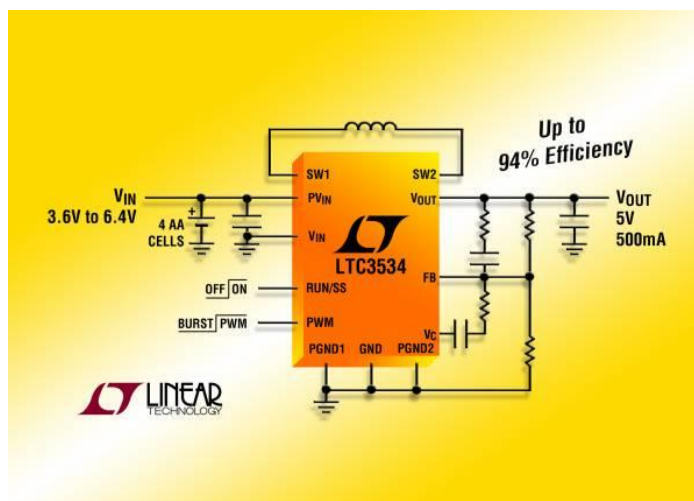
Obrázok 8.7: MAXIM 17710 integrovaný obvod.  
Prevzaté z: [23]



### 8.2.2. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.1 G – 0.3 G:

Keďže v rámci tohto rozsahu je generátor schopný dosahovať napätia od 3 V do 6 V, vhodným kandidátom bude buck-boost regulátor, ktorý je podľa potreby schopný pracovať buď s vyšším, nižším, alebo rovnakým napätím ako na výstupe.

Dobrým výberom je buck-boost DC-DC prepínací regulátor LTC3534 od spoločnosti Linear Technology znázornený na obr. 8.8, ktorý dokáže pracovať so vstupným napätím 2.4 V až 7 V a výstupným napätím 1.8 V až 7 V. Môže dosahovať účinnosť až 94 % a pri nárazovej prevádzke odoberá prúd len 25  $\mu$ A, čím maximalizuje životnosť použitých batérií. Jeho pracovná frekvencia je 1 MHz, vo vypnutom stave odoberá menej než 1  $\mu$ A a okrem iného obsahuje aj ochranu proti skratovaniu a prúdovému a teplotnému preťaženiu. Jeho rozmery sú 5 mm x 3 mm x 0.75 mm (dĺžka x šírka x hrúbka).



Obrázok 8.8: LTC3534 integrovaný obvod.  
Prevzaté z: [24]

### 8.2.3. Rozsah zrýchlenia vibrácií 0.3 G a viac:

V rámci tohto rozsahu zrýchlení vibrácií generátor poskytuje už pomerne vysoké hodnoty napätí (6 – 7 V), takže jasnou voľbou bude v tomto prípade buck regulátor, ktorý zníži hladinu napätia na úroveň požadovanú väčšinou bezdrôtových senzorov.

Dobrou možnosťou je buck regulátor TPS62122 od firmy Texas Instruments (obr. 8.9). Toto zariadenie je schopné spracovať vstupné napätie v rozsahu 2 – 15 V a poskytovať na výstupe napätie od 1.2 V do 5.5 V. Regulátor je schopný pracovať v úspornom energetickom režime, ktorým zabezpečuje vysokú účinnosť regulácie (až 96 %) pre širokú škálu použiteľnej záťaže, pričom v tomto režime odoberá prúd len 11  $\mu$ A. Pre záťaž, ktorými tečie malý prúd, pracuje regulátor v PFM režime a dokáže sa automaticky prepnúť do PWM režimu, keď prúd záťažou dosiahne vysoké hodnoty. Ďalšou dôležitou vlastnosťou je zabezpečenie minimálneho zvlnenia napätia na svojom výstupe. Jeho rozmery sú 2 mm x 2 mm x 0.75 mm (dĺžka x šírka x hrúbka).



Obrázok 8.9: TPS62122 integrovaný obvod.  
Prevzaté z: [25]

### 8.2.4. Ďalšie power management zariadenia použiteľné ako alternatívy:

Ďalšími zariadeniami vhodnými pre našu aplikáciu sú spomedzi znižujúcich regulátorov zariadenia MAX1626/MAX1627 od firmy Maxim a LTC3588-1 od firmy Linear Technology a spomedzi zvyšujúcich regulátorov LTC3105 taktiež od Linear Technology. Zaujímavým riešením je aj EnerChip Energy Processor CBC915 od firmy Cymbet.

## 9. Zhrnutie výsledkov práce

V kapitole 5 je uvedený prehľad power management elektroniky, pričom sú uvedené najpoužívanejšie riešenia v technickej praxi. Pri jednotlivých druhoch sa nachádza stručný popis funkcie a súhrn ich výhod a nevýhod, aby bolo možné na základe týchto faktov zvoliť optimálne riešenie pre našu aplikáciu. Nasledujúca kapitola 6 stručne popisuje batérie a akumulčné články, ktoré by mohli byť prípadne použité ako doplnkový zdroj energie pracujúci v súčinnosti s generátorom.

Siedma časť pojednáva o power management systémoch vyvinutých do dnešného dňa, pričom je kladený dôraz na systémy pre vibračné generátory fungujúce na piezoelektrickom a elektromagnetickom princípe. Poskytuje pohľad na princípy vytvorené odborníkmi vo svete, ktoré môžu byť do budúcnosti inšpiráciou pre vytvorenie komerčných produktov a môžu byť zároveň aj námetom pre vytvorenie vlastného power management systému na VUT, ktorý bude ušitý presne na mieru nášho vibračného generátora.

Ďalšie riadky sú venované rozboru chovania generátora pre rôzne zrýchlenia harmonických vibrácií, ako aj pre rôzne hodnoty pripojenej záťaže. Tento rozbor prebiehal za pomoci parametrov uvedených v Matlab súbore a modelu vytvoreného v prostredí Simulink. Výsledky sú uvedené v tabuľke, na základe ktorej je vybraný vhodný power management systém pre jednotlivé rozsahy zrýchlení vibrácií nielen teoreticky, ale je zvolené aj konkrétne komerčne dostupné riešenie, ktoré by mohlo byť zakúpené univerzitou.

## 10. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bol prieskum a analýza power management elektroniky, ktorá by bola schopná efektívne upravovať a spravovať energiu vytvorenú vibračným generátorom, a následný návrh komerčne dostupných riešení pre generátor špeciálne vyvinutý na VUT.

Pretože trh s power management elektronikou špecializovanou na energy harvesting aplikácie nie je v súčasnej dobe veľmi široký, táto práca uvádza z úzkeho spektra tú komerčne najzaujímavejšiu, ktorá sa javí ako najvhodnejšia pre náš vibračný generátor. Keďže sa do budúcnosti počíta s rozvojom energy harvesting systémov, zároveň sa nepochybne bude vyvíjať aj oblasť power managementu a budú sa zavádzať nové riešenia, ktoré by mohli byť založené aj na niektorých princípoch spomenutých v tejto práci.

## 11. Zoznam použitých zdrojov

- [1] HADAŠ, Z. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. 98 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitelé disertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, Csc., doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.
- [2] HADAŠ, Z.; ONDRŮŠEK, Č.; SINGULE, V.; KLUGE, M. Vibration Power Generator for Aeronautics Applications. In *Proceedings of the EUSPEN 10th Anniversary International Conference Volume I – Volume II. Zurich, 18-22 May, 2008*. Wien: Copy & Druck, 2008, pp. 46-50. ISBN 978-0-9553082-5-3.
- [3] HADAŠ, Z.; ONDRŮŠEK, Č.; SINGULE, V. Power sensitivity of vibration energy harvester. *Microsystem technologies*. Berlin / Heidelberg: Springer, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 691-702. ISSN 0946-7076.
- [4] VOREL, P.; PATOČKA M. *Průmyslová elektronika – skripta*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2007. 151 p.
- [5] PRIYA, S.; INMAN, D. J. *Energy Harvesting Technologies*. New York: Springer Science+Business Media, 2009. 517 p. ISBN 978-0-387-76463-4.
- [6] *Low-dropout regulator* [online]. 2005, 16.05.2012 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Ldo\\_regulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Ldo_regulator)>
- [7] PENELLA-LÓPEZ, M. T.; GASULLA-FORNER M. *Powering Autonomous Sensors: An Integral Approach with Focus on Solar and RF Energy Harvesting*. Dordrecht: Science+Business Media, 2011. 147 p. ISBN 978-94-007-1572-1.
- [8] ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004. 912 p. ISBN 978-0-7923-7270-7.
- [9] DUDNEY, N. J. Solid-state thin-film rechargeable batteries. *Materials Science and Engineering: B*, February 2005, vol. 116, no. 3, pp. 245-249.
- [10] CAO, X.; CHIANG, W.; KING, Y.; LEE, Y. Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC-DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, March 2007, vol. 22, no. 2, pp. 679-685. ISSN 0885-8993.
- [11] KONG, N.; COCHRAN, T.; HA, D. S.; LIN, H.; INMAN, D. J. A Self-powered Power Management Circuit for Energy Harvested by a Piezoelectric Cantilever. In *Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. USA, 21-25 February, 2010*. pp. 2154-2160. ISBN 978-1-4244-4782-4.

- [12] KONG, N.; DEYERLE, T. S.; HA, D. S. Universal Power Management IC for Small-Scale Energy Harvesting with Adaptive Impedance Matching. In *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. USA, 17-22 September, 2011*. pp. 3859-3863. ISBN 978-1-4577-0542-7.
- [13] DALLAGO, E.; DANIONI, A.; MARCHESI, M.; NUCITA, V.; VENCHI, G. A Self-Powered Electronic Interface for Electromagnetic Energy Harvester. *IEEE Transactions on Power Electronics*, November 2011, vol. 26, no. 11, pp. 3174-3182. ISSN 0885-8993.
- [14] YI, J.; SU, F.; LAM, Y.; KI, W.; TSUI, CH. An Energy-Adaptive MPPT Power Management Unit for Micro-Power Vibration Energy Harvesting. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems. USA, 18-21 May, 2008*. pp. 2570-2573. ISBN 978-1-4244-1683-7.
- [15] SHENCK, N. S.; PARADISO, J. A. Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics. *IEEE Micro*, May/June 2001, vol. 21, no. 3, pp. 30-42. ISSN 0272-1732.
- [16] DAYAL, R.; DWARI, S.; PARSA, L. A New Design for Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvesting Systems Using Coil Inductance of Microgenerator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, March/April 2011, vol. 47, no. 2, pp. 820-830. ISSN 0093-9994.
- [17] CHAO, P. C.; SHAO, C. I.; LU, C. X.; SUNG, C. K. A new energy harvest system with a hula-hoop transformer, micro-generator and interface energy-harvesting circuit. *Microsystem technologies*. Heidelberg: Springer, 2011, vol. 17, no. 5-7, pp. 1025-1036.
- [18] HADAŠ, Z.; SINGULE, V.; ONDRŮŠEK, Č. Verification of Vibration Power Generator Model for Prediction of Harvested Power. *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, 2010, no. 164, pp. 291-296. ISSN 1012-0394.
- [19] HADAŠ, Z.; SINGULE, V.; VĚCHET, S.; ONDRŮŠEK, Č. Development of Energy Harvesting Sources for Remote Applications as Mechatronic systems. In *14th International Power Electronics and Motion Control Conference. Macedonia, 6-8 September, 2010*. pp. 13-19. ISBN 9989-9785-1-4.
- [20] *Boost converter* [online]. 2005, 16.05.2012 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Boost\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter)>
- [21] *Buck converter* [online]. 2005, 15.05.2012 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Buck\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter)>
- [22] D'HULST, R.; STERKEN, T.; PUERS, R.; DRIESEN, J. Requirements for Power Electronics used for Energy Harvesting Devices. In *Technical Digest PowerMEMS: 5th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Application, Belgium, 28 November, 2005*. pp. 53-56.

- [23] *Industry's Lowest Power Usage for Efficient Energy Harvesting* [online]. 2011, [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/br/AN5071.pdf>>
- [24] *Linear Technology Photo Gallery* [online]. 2009, [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.linearnews.com/photopost/linear-technology-pr-photos/p603-ltc3534.html>>
- [25] *Best New Tech* [online]. 2010, [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://www.reviews-technology.com/2010\\_10\\_06\\_archive.html](http://www.reviews-technology.com/2010_10_06_archive.html)>

## 12. Zoznam použitých symbolov

|                  |  |                         |
|------------------|--|-------------------------|
| $m$              | celková hmotnosť sústavy                     | [kg]                    |
| $b$              | celkové tlmenie sústavy                      | [N.s.m <sup>-1</sup> ]  |
| $k$              | celková tuhosť sústavy                       | [N.m <sup>-1</sup> ]    |
| $Q(t)$           | budenie sústavy v závislosti na čase         | [N, m.s <sup>-2</sup> ] |
| $\ddot{\varphi}$ | uhlové zrýchlenie                            | [rad.s <sup>-2</sup> ]  |
| $\dot{\varphi}$  | uhlová rýchlosť                              | [rad.s <sup>-1</sup> ]  |
| $\varphi$        | uhlová výchylka                              | [rad]                   |
| $b_e$            | elektromagnetické tlmenie                    | [N.s.m <sup>-1</sup> ]  |
| $b_m$            | mechanické tlmenie                           | [N.s.m <sup>-1</sup> ]  |
| $\ddot{z}$       | uhlové zrýchlenie budiacej veličiny          | [rad.s <sup>-2</sup> ]  |
| $\Omega$         | vlastná uhlová frekvencia                    | [rad.s <sup>-1</sup> ]  |
| $b_k$            | kritické tlmenie                             | [N.s.m <sup>-1</sup> ]  |
| $\zeta_0$        | pomerný útlm sústavy                         | [-]                     |
| $A_v$            | zrýchlenie budiacich vibrácií                | [G, m.s <sup>-2</sup> ] |
| $u_i$            | indukované napätie                           | [V]                     |
| $l$              | vzdialenosť cievky od osi otáčania           | [m]                     |
| $B$              | magnetická indukcia                          | [T]                     |
| $N$              | počet závitov cievky                         | [-]                     |
| $L$              | dĺžka vodiča cievky                          | [m]                     |
| $F$              | elektromagnetická tlmiaca sila               | [N]                     |
| $v$              | relatívna rýchlosť kmitania budiaceho obvodu | [m.s <sup>-1</sup> ]    |
| $P$              | disipatívny výkon                            | [W]                     |
| $p$              | okamžitý celkový elektrický výkon            | [W]                     |
| $R_c$            | odpor cievky                                 | [Ω]                     |
| $R_z$            | odpor záťaže                                 | [Ω]                     |



### 13. Zoznam použitých obrázkov

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Elektromagnetický vibračný generátor vyvinutý na VUT v Brne a schéma celkového energy harvesting systému.....          | 12  |
|     | Prevzaté z: [2], [19]  |     |
| 4.2 | Všeobecná schéma vibračného generátora .....   | 13  |
|     | Prevzaté z: [3]  |     |
| 4.3 | Závislosť výstupného výkonu na veľkosti záťaže pri rezonančnej frekvencii pre rôzne hodnoty zrýchlenia vibrácií .....  | 17  |
|     | Prevzaté z: [2]  |     |
| 4.4 | Závislosť výstupného napätia na veľkosti záťaže pri rezonančnej frekvencii pre rôzne hodnoty zrýchlenia vibrácií ..... | 17  |
|     | Prevzaté z: [2]  |     |
| 5.1 | Základné zapojenie paralelného regulátora. ....  | 18  |
|     | Prevzaté z: [4]  |     |
| 5.2 | Základné zapojenie sériového regulátora.....   | 19  |
|     | Prevzaté z: [4]  |     |
| 5.3 | Základné zapojenie LDO regulátora .....  | 19  |
|     | Prevzaté z: [6]  |     |
| 5.4 | Základné zapojenie zvyšujúceho regulátora .....  | 20  |
|     | Prevzaté z: [20]   |     |
| 5.5 | Základné zapojenie znižujúceho regulátora.....   | 21  |
|     | Prevzaté z: [21]   |     |
| 5.6 | Základné zapojenie neinvertujúceho buck-boost regulátora .....   | 21  |
|     | Prevzaté z: [8]  |     |
| 5.7 | Porovnanie zapojenia neinvertujúceho a invertujúceho buck-boost regulátora .....                                       | 22  |
|     | Prevzaté z: [8]  |     |
| 5.8 | Základná schéma zapojenia a vysvetlenie princípu funkcie   |     |
|     | (a) buck (sériovo-paralelnej) nábojovej pumpy .....  | 232 |
|     | (b) boost (paralelne-sériovej) nábojovej pumpy.....  | 23  |
|     | Prevzaté z: [22]   |     |
| 6.1 | (a) Objemová (volumetric) a hmotnostná (gravimetric) hustota energie pre rôzne druhy primárnych batérií.....           | 25  |
|     | (b) Priebehy napätí jednotlivých druhov pri vybíjaní v závislosti na kapacite .....                                    | 25  |
|     | Prevzaté z: [7]  |     |
| 6.2 | (a) Objemová (volumetric) a hmotnostná (gravimetric) hustota energie pre rôzne druhy sekundárnych batérií.....         | 26  |
|     | (b) Priebehy napätí jednotlivých druhov pri nabíjaní a vybíjaní v závislosti na kapacite .....                         | 26  |
|     | Prevzaté z: [7]  |     |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>6.3</b> | Štruktúra superkapacitora .....   | <b>27</b> |
|            | Prevzaté z: [7]   |           |
| <b>6.4</b> | Prierez batériou s tenkým filmom .....  | <b>27</b> |
|            | Prevzaté z: [9]   |           |
| <b>7.1</b> | Celková schéma DC-DC prepínacieho PWM regulátora s feedforward a feedback obvodom. .... | <b>28</b> |
|            | Prevzaté z: [10]  |           |
| <b>7.2</b> | Schéma power management obvodu. ....  | <b>29</b> |
|            | Prevzaté z: [11]  |           |
| <b>7.3</b> | Schéma autonómneho power management systému .....                                       | <b>30</b> |
|            | Prevzaté z: [13]  |           |
| <b>7.4</b> | Zapojenie power management systému spolu so senzorom ako napájaným zariadením.....      | <b>31</b> |
|            | Prevzaté z: [14]  |           |
| <b>7.5</b> | Časť schémy regulačného power management obvodu. ....                                   | <b>32</b> |
|            | Prevzaté z: [15]  |           |
| <b>7.6</b> | Schéma priameho AC-DC boost regulátora .....  | <b>33</b> |
|            | Prevzaté z: [16]  |           |
| <b>7.7</b> | Celkový power management systém.....  | <b>33</b> |
|            | Prevzaté z: [16]  |           |
| <b>7.8</b> | LDO regulátor spolu s nabíjačom Li-ion batérie.....                                     | <b>34</b> |
|            | Prevzaté z: [17]  |           |
| <b>8.1</b> | Model subsystémov vibračného generátora a AC-DC usmerňovača.....                        | <b>35</b> |
| <b>8.2</b> | Model AC-DC usmerňovača s Graetzovým mostíkom a filtračným kondenzátorom .....          | <b>36</b> |
| <b>8.3</b> | Priebeh napätia na záťaži v závislosti na čase .....                                    | <b>38</b> |
| <b>8.4</b> | Priebeh prúdu záťažou v závislosti na čase .....  | <b>38</b> |
| <b>8.5</b> | Priebeh výkonu na záťaži v závislosti na čase .....                                     | <b>39</b> |
| <b>8.6</b> | Priebeh celkového výkonu v závislosti na čase.....                                      | <b>39</b> |
| <b>8.7</b> | MAXIM 17710 integrovaný obvod. ....   | <b>40</b> |
|            | Prevzaté z: [23]  |           |
| <b>8.8</b> | LTC3534 integrovaný obvod.....  | <b>41</b> |
|            | Prevzaté z: [24]  |           |
| <b>8.9</b> | TPS62122 integrovaný obvod. ....  | <b>42</b> |
|            | Prevzaté z: [25]  |           |

## **14. Zoznam príloh**

- P1 elektronická verzia bakalárskej práce
- P2 m-file so zadanými parametrami vibračného generátora
- P3 model vibračného generátora spolu s AC-DC usmerňovačom vytvorený v prostredí Simulink
- P4 MAX17710 Datasheet
- P5 LTC3534 Datasheet
- P6 TPS62122 Datasheet